



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁVRH KONSTRUKCE KŘÍDLA ČTYŘMÍSTNÉHO JEDNOMOTOROVÉHO LETOUNU

WING DESIGN FOR SINGLE-ENGINE FOUR-SEAT AIRCRAFT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. SLAVOMÍR RYBKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. IVO JEBÁČEK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Slavomír Rybka

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Stavba letadel (2301T039)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh konstrukce křídla čtyřmístného jednomotorového letounu

v anglickém jazyce:

Wing design for single-engine four-seat aircraft

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro nově navržený celokompozitní čtyřmístný letoun proveďte výpočet zatížení konstrukci křídla, návrh vlastní kompozitní konstrukce a pevnostní analýzu.

Cíle diplomové práce:

V rámci práce definujte obálku zatížení letounu, stanovte zatížení pro jednotlivé případy a konfigurace letounu a navrhnete celokompozitní konstrukce křídla. Následně proveďte pevnostní analýzu konstrukce včetně jednotlivých konstrukčních detailů a navrhnete způsob ověření únosnosti statickými pevnostními zkouškami, které zpracujete do uceleného programu zkoušek. V práci postupujte dle pokynů vedoucího.

Seznam odborné literatury:

Baker, A., Dutton, S., Kelly, D., Composite Materials for Aircraft Structures, ISBN 1-56-347-540-5, RAIAA, Reston, Virginia, 2004

Juračka, Kompozitní konstrukce v letectví, Zpráva LÚ01-2007-OST.ST, rev 4, VUT v Brně

Stavební předpis CS - 23

Manuály k programu Wing.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 18.11.2013

L.S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Obsahom diplomovej práce je oboznámenie sa s lietadlom TL4000 a technickými parametrami krídla. Práca zahŕňa výpočet letových obálok podľa predpisu CS 23 v troch hmotnostných konfiguráciách a výpočet zaťaženia pre všetky body obálky. V práci je uskutočnený návrh konštrukcie krídla a jeho jednotlivých prvkov. Pevnostnou analýzou jednotlivých konštrukčných prvkov krídla je určený súčiniteľ rezervy konkrétnych častí. Súčasťou diplomovej práce je aj návrh a metodika statickej pevnostnej skúšky krídla, ktorú požaduje predpis pre danú kategóriu lietadiel (CS 23).

Abstract

The content of the thesis is familiarization with the aircraft TL4000 and technical parameters wings. The work includes calculation of flight envelopes as prescribed CS 23 in three weight configurations and load calculation for all points of the envelope. The work is carried out structural design wings and its elements. The stress analysis of individual design elements wing is designed to specific parts of the reserve factor. Part of the thesis is the design and methodology for the static strength test wing that required a prescription for that category of aircraft (CS 23).

Kľúčová slova

Krídlo, zaťaženie, statická skúška, maximálny ohyb, maximálny krut, kompozitová konštrukcia

Keywords

Wing, loading, static test, the maximum bending, maximum torque, composite structure

Bibliografická citace

RYBKA, S. Návrh konstrukce křídla čtyřmístného jednomotorového letounu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 120s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem vypracoval diplomovou práci samostatně s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 25. května 2014

.....

Bc. Slavomír Rybka

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivovi Jebáčkovi, Ph.D. za vedení a pomoc při tvorbě této diplomové práce.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1 Úvod..... | 11 |
| 2 Definície a vstupy..... | 12 |
| 2.1 Definícia a požiadavky na lietadlo | 12 |
| 2.2 Krídlo..... | 12 |
| 2.1.1 Geometrické krútenie krídla | 14 |
| 2.1.2 Aerodynamické krútenie krídla | 15 |
| 2.3 Tabuľkový prehľad parametrov krídla | 16 |
| 3 Hmotnostný rozbor | 17 |
| 4 Zaťaženie krídla | 18 |
| 4.1 Obálka zaťaženia | 18 |
| 4.1.1 Obratová obálka..... | 18 |
| 4.1.2 Klapková obálka | 23 |
| 4.1.3 Poryvová obálka | 25 |
| 4.2 Zaťaženie krídla..... | 31 |
| 4.2.1 Prípady zaťaženia | 32 |
| 4.2.1.1 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxTOW} | 32 |
| 4.2.1.1 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MinTOW} | 32 |
| 4.2.1.1 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxNLP} | 33 |
| 4.2.2 Aerodynamické zaťaženie krídla..... | 34 |
| 4.2.3 Zaťaženie krídla od zotrvačných síl | 36 |
| 4.2.4 Početné zaťaženie | 39 |
| 5 Konštrukcia krídla | 40 |
| 6 Pevnostná analýza | 42 |
| 6.1 Geometria | 43 |
| 6.2 Pevnostná kontrola nosníku..... | 44 |
| 6.2.1 Pevnostná kontrola pásnic | 44 |
| 6.2.2 Pevnostná kontrola stojny..... | 48 |
| 6.2.2.1 Šmykové toky v stojnách od posúvajúcich síl..... | 48 |
| 6.2.2.2 Šmykové toky v stojnách od krútiaceho momentu..... | 49 |
| 6.2.2.3 Výsledné šmykové toky v stojnách nosníkov..... | 51 |
| 6.2.2.4 Súčinitele rezervy stojny | 52 |
| 6.2.3 Pevnostná kontrola lepeného spoja pásnice a stojny | 54 |
| 6.2.4 Pevnostná kontrola krakorcov | 55 |
| 6.3 Pevnostná kontrola poťahu..... | 58 |
| 6.4 Pevnostná kontrola koreňového rebra | 59 |
| 6.4.1 Kontrola lepených spojov koreňového rebra..... | 60 |
| 7 Statická skúška krídla | 62 |
| 7.1 Skúšané prípady..... | 62 |
| 7.2 Klieštiny | 64 |
| 7.3 Určenie normálových a tečných zložiek síl..... | 64 |
| 7.4 Uchytenie krídla v skúšobni | 65 |
| 7.4.1 Prípravok na uchytenie krídla..... | 66 |
| 7.4.1.1 Únosnosť prípravku..... | 67 |
| 7.5 Skúška maximálneho ohybu krídla..... | 69 |
| 7.5.1 Vahadlový systém pre skúšku maximálneho ohybu | 71 |
| 7.6 Skúška maximálneho krutu krídla | 74 |
| 7.6.1 Vahadlový systém pre skúšku maximálneho krutu | 77 |
| 7.7 Skúška maximálneho ohybu krídla s plnou nádržou | 79 |

| | |
|---|-----------|
| 7.7.1 Vahadlový systém pre skúšku maximálneho ohybu | 82 |
| 7.8 Postup skúšok..... | 84 |
| 8 Záver | 86 |
| Zoznam použitých zdrojov | 87 |
| Zoznam príloh | 88 |
| Zoznam skratiek, veličín a jednotiek..... | 89 |
| Zoznam obrázkov..... | 92 |
| Zoznam tabuliek..... | 93 |
| Prílohy | 94 |

1 Úvod

Témou tejto diplomovej práce je návrh konštrukcie krídla pre lietadlo TL4000. Toto lietadlo je štvormiestne jednomotorové s celokompozitovou konštrukciou.

Súčasťou práce je výpočet letových obálok podľa predpisu CS23 v kategórii normál. Následným výpočtom zaťaženia vo všetkých bodoch obálok pre všetky hmotnostné konfigurácie sa určí, ktoré fázy letu sú kritické pre konštrukciu krídla a veľkosti zaťaženia v týchto prípadoch.

Cieľom práce je aj samotný návrh konštrukcie krídla, ktorá obsahuje návrh jednotlivých prvkov konštrukcie a ich umiestnenia. Jedným z bodov návrhu konštrukcie je voľba materiálu pre jednotlivé konštrukčné diely a spojovacieho materiálu.

Pevnostnou analýzou sa v práci overí vhodnosť volených materiálov, prípadne ich dostatočné množstvo na to, aby konkrétny konštrukčný prvok dokázal preniesť vypočítané početné zaťaženie s čo najpriateľnejším súčiniteľom rezervy.

Predpis CS 23 stanovuje nutnosť statickej skúšky krídla. V tejto diplomovej práci je vypracovaný návrh skúšky únosnosti krídla pre lietadlo TL4000. Je spracovaný v ucelený program jednotlivých skúšok.

2 Definície a vstupy

2.1 Definícia a požiadavky na lietadlo

Lietadlo TL4000 je štvormiestne lietadlo určené pre súkromné lety. Ponúkané bude na európskom a severoamerickom trhu. Letún pojme 4 osoby – 2 pilotov a 2 cestujúcich. Konštrukcia lietadla je zvolená celokompozitová. Únava konštrukcie je riešená konceptom SAFE LIFE s počiatočným stavom 20 000 hodín. Jedná sa o dolnoplošník so samonosným krídlom. Podvozok bude pevný, kde bude ovládateľné predné koleso. Pohon zaobstará motor Continental IO-550. Maximálna vzletová hmotnosť je stanovená na 1550 kg. Technické parametre sú uvedené v tabuľke č.1. Lietadlo musí spĺňať tieto požiadavky:

- cestovnú rýchlosť okolo 300 km/h
- možnosť certifikácie podľa predpisov FAR-23 Amdt. 62 resp. CS-23 Amdt. 2 v kategórii NORMAL
- maximálne pohodlie kabíny
- vzlet aj z trávnatých plôch a v minimálnej dĺžke 700 m
- dobrú ovládateľnosť

Tab. 1 Základné parametre TL 4000

| Základné parametre lietadla | | | |
|--|--------------|--------|-------|
| Dĺžka | dl | [mm] | 7915 |
| Rozpätie krídla | b | [mm] | 10800 |
| Výška | h | [mm] | 2220 |
| Maximálna vzletová hmotnosť | m_{MaxTOW} | [kg] | 1550 |
| Minimálna vzletová hmotnosť | m_{MinTow} | [kg] | 900 |
| Maximálna hmotnosť paliva | m_{PalMAX} | [kg] | 240 |
| Kapacita nádrží | V_{pal} | [l] | 300 |
| Počet sedadiel | - | [-] | 4 |
| Maximálna šírka kabíny | b_{Kab} | [mm] | 1,3 |
| Maximálna výška kabíny | h_{kab} | [mm] | 1,25 |
| Predpokladaná cestovná rýchlosť | vc | [km/h] | 350 |
| Predpokladaná maximálna rýchlosť horizontálneho letu | v_{hmax} | [km/h] | 400 |

2.2 Krídlo

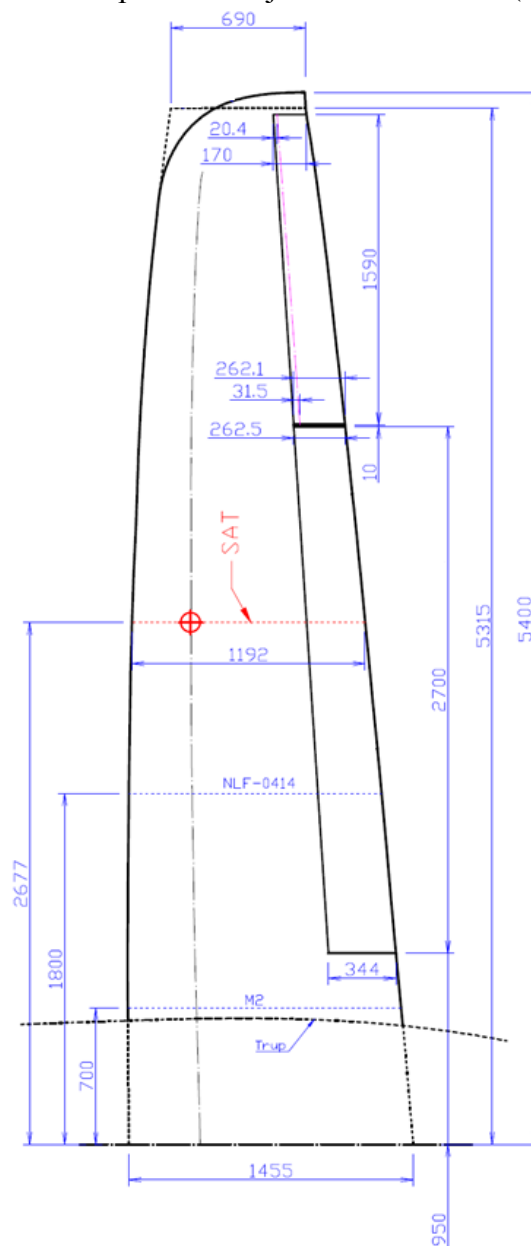
Krídlo, rovnako ako celé lietadlo, je navrhované ako celokompozitové. Rozpätie krídla tohto modelu je navrhnuté na 10800 mm a plocha krídla je 12,34 m². V krídlach budú zabudované nádrže na palivo, kde na každej strane bude jedna s objemom 150 litrov paliva. Na základe aerodynamickej analýzy bol zvolený pôdorysný tvar krídla v tvare interpolácie elipsy a obdĺžnika (obr. 1). Stredná aerodynamická tetiva C_{SAT} je 1195 mm je vo vzdialenosti 2677 od pozdĺžnej osi lietadla.



Obr. 1 Pôdorysný tvar krídla

Ďalšími aerodynamickými analýzami bolo určené geometrické a aerodynamické krútenie krídla. Oba spomenuté krútenia sú nelineárne po rozpätí.

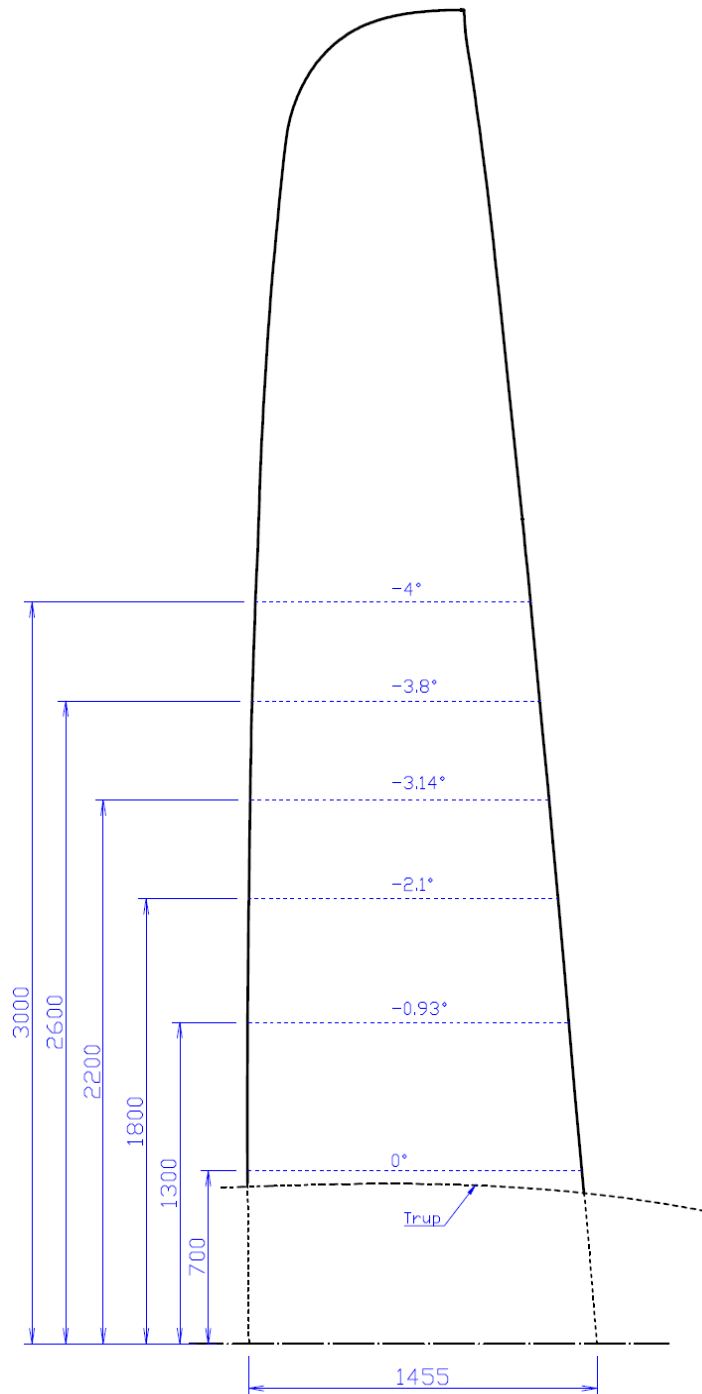
Krídlo je vybavené štrbinovými vztlakovými klapkami s priamou osou otáčania. Zaberajú 25% hĺbky krídla v každom reze. Začínajú 950 mm od pozdĺžnej osi lietadla a majú rozpätie 2700 mm (obr. 2). Výchylky klapiek sú 15° pre vzletovú konfiguráciu a 40° pre pristávaciu konfiguráciu. Na odtokovej hrane sú navrhnuté tiež krídelká. Ich hĺbka bude 25% z hĺbky krídla. Začínajú tesne za klapkami a majú dĺžku 1590 mm (obr. 2) [6].



Obr. 2 Geometria krídla

2.1.1 Geometrické krútenie krídla

Pri lineárnom krútení krídla, ktoré bolo prvoplánové, sa prúd náhle odtrhol na väčšine plochy krídla. Zabránenie nastúpenia tomu má zaistiť práve nelineárne krútenie krídla po polrozpätí, ktoré je najlepšie poznateľné z obrázku č.3. Od vzdialenosti 700 mm od pozdĺžnej osi lietadla po vzdialenosť 3340 mm sa krídlo krúti lineárne z 0° až na -4° . Od 3000 mm si krídlo drží konštantných -4° až po jeho koniec [6].



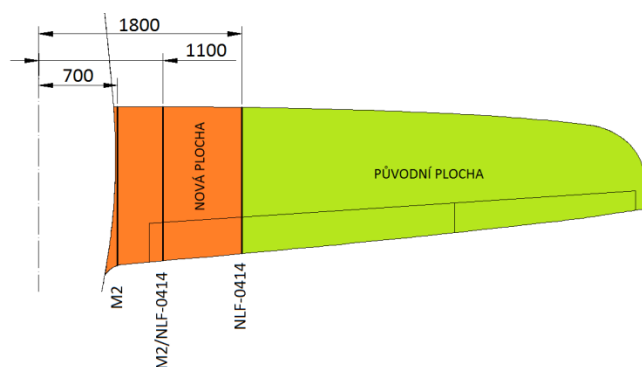
Obr. 3 Geometrické krútenie krídla

2.1.2 Aerodynamické krútenie krídla

Pri aerodynamickom koncepčnom návrhu bola myšlienka vývoja vlastného profilu zamietnutá z dôvodu nadmerných nákladov na vývoj a testovanie. Pri preskúmaní už existujúcich profilov sa zistilo, že najviac vyhovuje požiadavkám pre dané lietadlo laminárny profil NLF-0414. V koreňovej časti bol navrhnutý profil M2, ktorý je zlúčením a pozmenením viacerých profilov. Hlavné dôvody pre voľbu tohto profilu boli:

1. Zníženie kritického uhla nábehu krídla ako u NLF-0414. Toto opatrenie malo za následok, že prúd sa začal odtrhovať pri trupe a nie v mieste krídeliek, čo je pozitívny efekt.
2. Zvýšenie novej maximálnej efektívnej výšky nosníku oproti NLF-0414.

Profiláž sa po rozpätí krídla nemení lineárne. Je navrhnutá tak, aby čo najlepšie kopírovala priebeh zaťaženia po rozpätí. Preto je profil M2 použitý pri trupe, tj. vo vzdialenosti 900 mm od pozdĺžnej osi. 1100 mm od osi lietadla je použitý profil, ktorý vznikol lineárnou interpoláciou profilov M2 a NLF-0414. Od vzdialenosti 1800 mm je profil NLF-0414, ktorý pokračuje až na koniec krídla (obr. 4).



Obr. 4 Profiláž po polrozpätí krídla

2.3 Tabuľkový prehľad parametrov krídla

Tab. 2 Parametre krídla

| Parametre krídla | | | |
|---|------------------|---------------------|----------|
| Profil v koreni | - | [-] | M2 |
| Profil na konci krídla | - | [-] | NFL-0414 |
| Sklon vztlakovej čiary | Cl_{α} | $[\text{rad}^{-1}]$ | 5,2794 |
| Rozpätie | b | [mm] | 10800 |
| Plocha | S | $[\text{m}^2]$ | 12,307 |
| Stredná aerodynamická tetiva | c_{SAT} | [mm] | 1,195 |
| Hĺbka krídla v koreni | c_0 | [mm] | 1,455 |
| Teoretická hĺbka krídla na konci | c_k | [mm] | 0,69 |
| Štíhlosť | λ | [-] | 9,17 |
| Uhol šípu | χ | $[\circ]$ | -0,25 |
| Vzopätie | ψ | $[\circ]$ | 3 |
| Uhol geometrického krútenia (na konci krídla voči koreňu) | ϵ | $[\circ]$ | -4 |
| Maximálny súčiniteľ vztlaku krídla | C_{LKrMAX} | [-] | 1,4509 |
| Rozpätie krídelka | b_{kr} | [mm] | 1590 |
| Hĺbka krídelka | c_{Kr} | [%] | 25 |
| Maximálna dolná výchylka krídelka | δ_{kr-} | $[\circ]$ | -24 |
| Maximálna horná výchylka krídelka | δ_{kr+} | $[\circ]$ | 16 |
| Hĺbka klapky | c_{kl} | [%] | 25 |
| Rozpätie klapky | b_{kl} | [mm] | 2700 |
| Maximálna výchylka klapky | δ_{klmax} | $[\circ]$ | 40 |

3 Hmotnostný rozbor

Lietadlo je možné pri hmotnostnom rozbere rozdeliť do niekoľkých konštrukčných skupín, ktoré sú nevyhnuté a pevne dané. Súčet hmotností týchto konštrukčných skupín udáva hmotnosť prázdneho lietadla. Jedná sa o konštrukčné skupiny:

- Trup
- Krídlo
- Chvostové plochy
- Riadenie
- Podvozok
- Pohonná sústava
- Inštalácia motoru
- Výstroj
- P.O, Náter, tesniace hmoty

Podrobný hmotnostný rozbor je uvedený v Prílohe číslo 1. Podstatné pre výpočet problémov tejto diplomovej práce budú najmä hmotnosti troch rozoberaných hmotnostných konfigurácií - hmotnosť krídla, hmotnosť paliva a palivovej inštalácie v krídle. Tieto hodnoty sú uvedené v tabuľke číslo 3.

Tab. 3 Vybrané hmotnosti

| Vybrané hmotnosti | | | |
|---|----------------------|------|--------|
| Maximálna vzletová hmotnosť | m_{MaxTOW} | [kg] | 1550 |
| Maximálna hmotnosť nevztlakových častí lietadla | m_{MaxNLP} | [kg] | 1358,6 |
| Minimálna vzletová hmotnosť | m_{MinTOW} | [kg] | 900 |
| Hmotnosť pravého krídla ako celku | m_{Kr} | [kg] | 80,3 |
| Hmotnosť palivovej inštalácie krídla | m_{Pal} | [kg] | 5,200 |
| Hmotnosť paliva v jednom krídle | $m_{\text{Pal_kr}}$ | [kg] | 108 |

4 Zaťaženie krídla

4.1 Obálka zaťaženia

Predpis CS-23 definuje, že obálka sa má riešiť pre každú hmotnostnú konfiguráciu a pre každú nadmorskú výšku podľa MSA. [2] V tejto práci sa bude počítať s tromi reprezentujúcimi prípadmi. Prvý je s maximálnou možnou vzletovou hmotnosťou pri $H=0$ MSA. Druhý prípad je pre minimálnu vzletovú hmotnosť a $H=0$ MSA. Tretí prípad je uvažovaná maximálna hmotnosť nevztlakových častí lietadla a rovnako $H=0$ MSA. Všetky tieto prípady sú počítané pre nulovú nadmorskú výšku podľa medzinárodnej štandardnej atmosféry. Je to z dôvodu, že pri 0 metroch nad morom je hustota najvyššia. Po dosadení do vzorcov a vypočítaní by vyšlo, že najväčší násobok bude vždy pri najväčšej hustote.

Výpočet obálky zaťaženia

Lietadlo sa počas prevádzky môže dostať do rôznych kombinácií násobku a rýchlosti. Obálka definuje všetky kombinácie, ktoré konštrukcia lietadla musí preniesť s určitým súčiniteľom bezpečnosti. Presnú podobu obálky definujú predpisy. Lietadlo TL 4000 je konštruované na základe predpisu CS-23, Amdt.2. Celková obálka zaťaženia sa skladá z troch častí. Ide o poryvovú, klapkovú a obratovú obálku. [1]

4.1.1 Obratová obálka

Predpis CS-23.333 definuje nutnosť poznať pre výpočet obratovej obálky prevádzkové násobky zaťaženia pri obratoch.

Prevádzkové násobky zaťaženia pri obratoch

Tieto násobky presne určuje predpis CS-23.337.

Kladný násobok je určený vzorcom:

$$n = 2,1 + \frac{24000}{W + 10000} = 3,889$$

Podľa predpisu nemusí byť kladný násobok väčší ako 3,8, preto volím $n_1 = 3,8$.

Záporný prevádzkový násobok pri obratoch podľa predpisu nemusí byť väčší, než 0,4 násobok kladného prevádzkového násobku. Hodnota záporného prevádzkového násobku je tým pádom $n_2 = 1,52$.

Pre prehľadnosť sú vypočítané hodnoty uvedené v tabuľke č.4 .

Tab. 4 Násobky zaťaženia pri manévroch

| Násobky zaťaženia pri manévroch | | | |
|------------------------------------|----------------|-----|-------|
| Kladný násobok určený vzorcom | n | [-] | 3,889 |
| Zvolený kladný prevádzkový násobok | n ₁ | [-] | 3,8 |
| Záporný prevádzkový násobok | n ₂ | [-] | 1,52 |

Návrhové rýchlosti letu

Pri určovaní návrhových rýchlostí je podstatná hmotnostná konfigurácia lietadla. Je to vidieť podľa vzorcov uvedených v CS – 23.335. Preto je nižšie postupne vypočítaná obálka pre všetky hmotnostné konfigurácie uvažované v tejto práci.

Pádová rýchlosť pre:

m_{MaxTOW}:

$$v_{SmMaxTOW} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MaxTOW} \cdot g}{\rho \cdot C_{Lkridla} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1550 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 1,4509 \cdot 12,34}} = 37,23 \frac{m}{s} = 134,03 \frac{km}{h}$$

m_{MinTOW}:

$$v_{SmMinTOW} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MinTOW} \cdot g}{\rho \cdot C_{Lkridla} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 900 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 1,4509 \cdot 12,34}} = 27,41 = 102,27 \frac{km}{h}$$

Pre m_{MaxNLP}:

$$v_{SmMaxNLP} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MaxNLP} \cdot g}{\rho \cdot C_{Lkridla} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1358,6 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 1,4509 \cdot 12,34}} = 34,9 \frac{m}{s} = 125,65 \frac{km}{h}$$

Pádová rýchlosť pri lete na chrbte pre:

m_{MaxTOW}:

$$v_{SCHmMaxTOW} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MaxTOW} \cdot g}{\rho \cdot C_{LkridlaCH} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1550 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 0,8 \cdot 1,4509 \cdot 12,34}} = 41,62 \frac{m}{s} = 149,85 \frac{km}{h}$$

m_{MinTOW}:

$$v_{SCHmMinTOW} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MinTOW} \cdot g}{\rho \cdot C_{LkridlaCH} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 900 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 0,8 \cdot 1,4509 \cdot 12,34}} = 31,76 \frac{m}{s} = 114,34 \frac{km}{h}$$

m_{MaxNLP}:

$$v_{SCHmMaxNLP} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MaxNLP} \cdot g}{\rho \cdot C_{LkridlaCH} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1358,6 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 0,8 \cdot 1,4509 \cdot 12,34}} = 39,02 \frac{m}{s} = 140,48 \frac{km}{h}$$

Návrhová cestovná rýchlosť pre všetky hmotnostné konfigurácie:

Na základe predpisu CS 23.335 je návrhová cestovná rýchlosť určená vzťahmi:

$$K = \frac{W}{S} = \frac{3417,165 \text{ lbs}}{132,778 \text{ ft}^2} = 25,736 \frac{\text{lbs}}{\text{ft}^2}$$

$$v_{Cmin} \geq 33 \sqrt{\frac{W}{S}}$$

Predpis udáva, že v prípade, ak vyjde K väčšie ako 20, môže byť súčiniteľ znížený lineárne na hodnotu 28,6 pri K=100.

$$33 + \frac{28,6 - 33}{100 - 20} (25,736 - 20) = 32,685$$

$$v_{Cmin} \geq 32,685 \sqrt{\frac{W}{S}} = 165,81 \text{ kts} = 307 \text{ km/h}$$

$$v_{Cmax} \leq 0,9 \cdot v_H = 0,9 \cdot 400 \text{ km/h} = 360 \text{ km/h}$$

Zvolená cestovná rýchlosť $v_C = 320 \text{ km/h}$

Návrhová rýchlosť strmhlavého letu pre všetky hmotnostné konfigurácie:

Podľa CS 23.335 je určená týmito vzťahmi:

$$v_{Dmin} \geq 1,25 \cdot v_C = 1,25 \cdot 320 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 400 \text{ km/h}$$

$$v_{Dmin (2)} \geq 1,40 \cdot v_{Cmin} = 1,40 \cdot 307 \frac{\text{km}}{\text{h}} \doteq 430 \text{ km/h}$$

Zvolená rýchlosť strmhlavého letu $v_D = 440 \text{ km/h}$

Návrhová obratová rýchlosť:

Podľa CS 23.335 je určená uvedeným vzťahom:

Pre m_{MaxTOW} :

$$v_{AmMaxTOW} = v_{s mMaxTOW} \sqrt{n_1} = 134,03 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \sqrt{3,8} = 261,27 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Pre m_{MinTOW} :

$$v_{AmMinTOW} = v_{s mMinTOW} \sqrt{n_1} = 102,27 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \sqrt{3,8} = 199,36 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Pre m_{MaxNLP} :

$$v_{AmMaxNLP} = v_{s mMaxNLP} \sqrt{n_1} = 125,65 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \sqrt{3,8} = 244,94 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Návrhová obratová rýchlosť na chrbte:

Podľa CS 23.335 je určená týmito vzťahmi:

Pre m_{MaxTOW} :

$$v_{GmMaxTOW} = v_{sCHmMaxTOW} \sqrt{n_2} = 149,85 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \sqrt{1,52} = 184,75 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

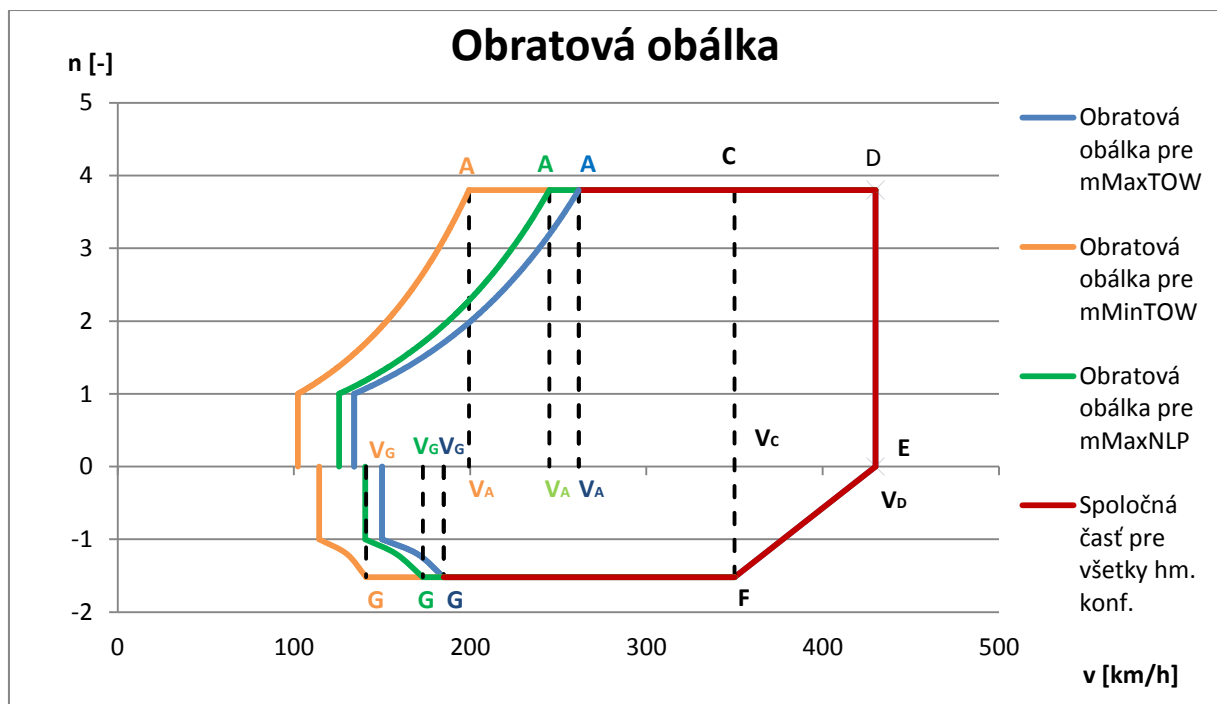
Pre m_{MinTOW} :

$$v_{GmMinTOW} = v_{sCHmMinTOW} \sqrt{n_2} = 114,34 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \sqrt{1,52} = 140,97 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Pre m_{MaxNLP} :

$$v_{GmMaxNLP} = v_{sCHmMaxNLP} \sqrt{n_2} = 140,48 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \sqrt{1,52} = 173,2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Grafické znázornenie obratovej obálky pre všetky tri hmotnostné konfigurácie je na obrázku číslo 5.



Obr. 5 Obratová obálka pre všetky hmotnostné konfigurácie

Pre prehľadnosť sú vypočítané hodnoty uvedené v tabuľke č. 5.

Tab. 5 Tabuľka vypočítaných hodnôt pre obrátové obálky

| Návrhové rýchlosti | | | |
|--|------------------|-----------------------|--------|
| Pádová rýchlosť pre m_{MaxTOW} | $V_{sMaxTOW}$ | [m/s] | 37,28 |
| | | [km/h] | 134,21 |
| Pádová rýchlosť na chrbte pre m_{MaxTOW} | $V_{schMaxTOW}$ | [m/s] | 41,68 |
| | | [km/h] | 150,05 |
| Pádová rýchlosť pre m_{MinTOW} | $V_{sMinTOW}$ | [m/s] | 28,41 |
| | | [km/h] | 102,27 |
| Pádová rýchlosť na chrbte pre m_{MinTOW} | $V_{schMinTOW}$ | [m/s] | 31,76 |
| | | [km/h] | 114,34 |
| Pádová rýchlosť pre m_{MaxNLP} | $V_{smMaxNLP}$ | [m/s] | 34,90 |
| | | [km/h] | 125,65 |
| Pádová rýchlosť na chrbte pre m_{MaxNLP} | $V_{schmMaxNLP}$ | [m/s] | 39,02 |
| | | [km/h] | 140,48 |
| Plošné zaťaženie krídla | K | [lb/ft ²] | 25,80 |
| Súčiniteľ (33) | - | [-] | 32,68 |
| Minimálna cestovná rýchlosť | V_{Cmin} | [kts] | 166,01 |
| | | [km/h] | 307,46 |
| Maximálna cestovná rýchlosť | V_{Cmax} | [km/h] | 360,00 |
| Zvolená cestovná rýchlosť | V_C | [km/h] | 350,00 |
| Minimálna rýchlosť strmhlavého letu | V_{Dmin} | [km/h] | 437,50 |
| Minimálna rýchlosť strmhlavého letu | V_{Dmin} | [km/h] | 430,44 |
| Zvolená rýchlosť strmhlavého letu | V_D | [km/h] | 440,00 |
| Obrátová rýchlosť pre m_{MaxTOW} | $V_{AmMaxTOW}$ | [km/h] | 261,62 |
| Obrátová rýchlosť m_{MinTOW} | $V_{AmMinTOW}$ | [km/h] | 199,36 |
| Obrátová rýchlosť m_{MaxNLP} | $V_{AmMaxNLP}$ | [km/h] | 244,94 |
| Obrátová rýchlosť na chrbte pre m_{MaxTOW} | $V_{GmMaxTOW}$ | [km/h] | 184,99 |
| Obrátová rýchlosť na chrbte m_{MinTOW} | $V_{GmMinTOW}$ | [km/h] | 140,97 |
| Obrátová rýchlosť na chrbte m_{MaxNLP} | $V_{GmMaxNLP}$ | [km/h] | 173,20 |

4.1.2 Klapková obálka

Podľa predpisu CS – 23.345 (a) nesmie pri plne vysunutých klapkách a rýchlosti VF prekročiť kladný obratový násobok hodnotu 2. Zároveň predpis CS-23.345 (b) určuje aj spomenutú hodnotu rýchlosti VF. Táto hodnota rýchlosti nesmie byť menšia než 1,4 násobok pádovej rýchlosti alebo 1,8 násobok pádovej rýchlosti s plne vysunutými klapkami. Volí sa väčšia z týchto rýchlostí. [2].

Pre m_{MaxTOW} :

$$v_{SF} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MaxTOW} \cdot g}{\rho \cdot C_{Lklapka} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1550 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 2,03 \cdot 12,302}} = 31,52 \frac{m}{s} = 113,46 \frac{km}{h}$$

$$v_{Fmin(1)} = 1,4 \cdot v_{SmMaxTOW} = 134,21 \frac{km}{h} \cdot 1,4 = 187,89 \frac{km}{h}$$

$$v_{Fmin(2)} = 1,8 \cdot v_{SF} = 113,46 \frac{km}{h} \cdot 1,8 = 204,23 \frac{km}{h}$$

Zvolená rýchlosť $v_F = 205,2 \frac{km}{h}$

$$v_{AF} = v_S \cdot \sqrt{n_K} = 53 \frac{m}{s} = 190 \frac{km}{h}$$

Pre prehľadnosť sú vypočítané hodnoty uvedené v tabuľke č. 6.

Tab. 6 Klapková obálka m_{MaxTOW}

| Klapková obálka m_{MaxTOW} | | | |
|---|---------------|--------|--------|
| Minimálna pádová rýchlosť s vysunutými klapkami | v_{SF} | [m/s] | 31,52 |
| | | [km/h] | 113,46 |
| Klapkový násobok podľa CS23.335 | n_K | [-] | 2 |
| 1,4 v_S | $v_{Fmin(1)}$ | [m/s] | 52,19 |
| | | [km/h] | 187,89 |
| 1,8 v_{SF} | $v_{Fmin(2)}$ | [m/s] | 56,73 |
| | | [km/h] | 204,23 |
| Uvažovaná rýchlosť podľa CS23.335 | v_F | [m/s] | 57,00 |
| | | [km/h] | 205,20 |
| Návrhová obratová rýchlosť letu s vysunutými klapkami | v_{AF} | [m/s] | 53 |
| | | [km/h] | 190 |

Pre m_{MinTOW} :

$$v_{SF} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MinTOW} \cdot g}{\rho \cdot C_{Lklapka} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 900 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 2,03 \cdot 12,302}} = 24,02 \frac{m}{s} = 86,46 \frac{km}{h}$$

$$v_{Fmin(1)} = 1,4 \cdot v_{SmMinTOW} = 102,27 \frac{km}{h} \cdot 1,4 = 143,17 \frac{km}{h}$$

$$v_{Fmin(2)} = 1,8 \cdot v_{SF} = 143,17 \frac{km}{h} \cdot 1,8 = 155,63 \frac{km}{h}$$

Zvolená rýchlosť $v_F = 158,4 \frac{km}{h}$

$$v_{AF} = v_S \cdot \sqrt{n_K} = 40 \frac{m}{s} = 145 \frac{km}{h}$$

Tab. 7 Klapková obálka pre m_{MinTOW}

| Klapková obálka pre m_{MinTOW} | | | |
|---|---------------|--------|--------|
| Minimálna pádová rýchlosť s vysunutými klapkami | v_{SF} | [m/s] | 24,02 |
| | | [km/h] | 86,46 |
| Klapkový násobok podľa CS23.335 | n_K | [-] | 2 |
| $1,4 v_S$ | $v_{Fmin(1)}$ | [m/s] | 39,77 |
| | | [km/h] | 143,17 |
| $1,8 v_{SF}$ | $v_{Fmin(2)}$ | [m/s] | 43,23 |
| | | [km/h] | 155,63 |
| Uvažovaná rýchlosť podľa CS23.335 | v_F | [m/s] | 44,00 |
| | | [km/h] | 158,40 |
| Návrhová obratová rýchlosť letu s vysunutými klapkami | v_{AF} | [m/s] | 40 |
| | | [km/h] | 145 |

Pre m_{MaxNLP} :

$$v_{SF} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MaxNLP} \cdot g}{\rho \cdot C_{Lklapka} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1358,6 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 2,03 \cdot 12,302}} = 29,51 \frac{m}{s} = 106,23 \frac{km}{h}$$

$$v_{Fmin(1)} = 1,4 \cdot v_{SmMaxNLP} = 125,65 \cdot 1,4 = 175,91 \frac{km}{h}$$

$$v_{Fmin(2)} = 1,8 \cdot v_{SF} = 106,23 \frac{km}{h} \cdot 1,8 = 191,21 \frac{km}{h}$$

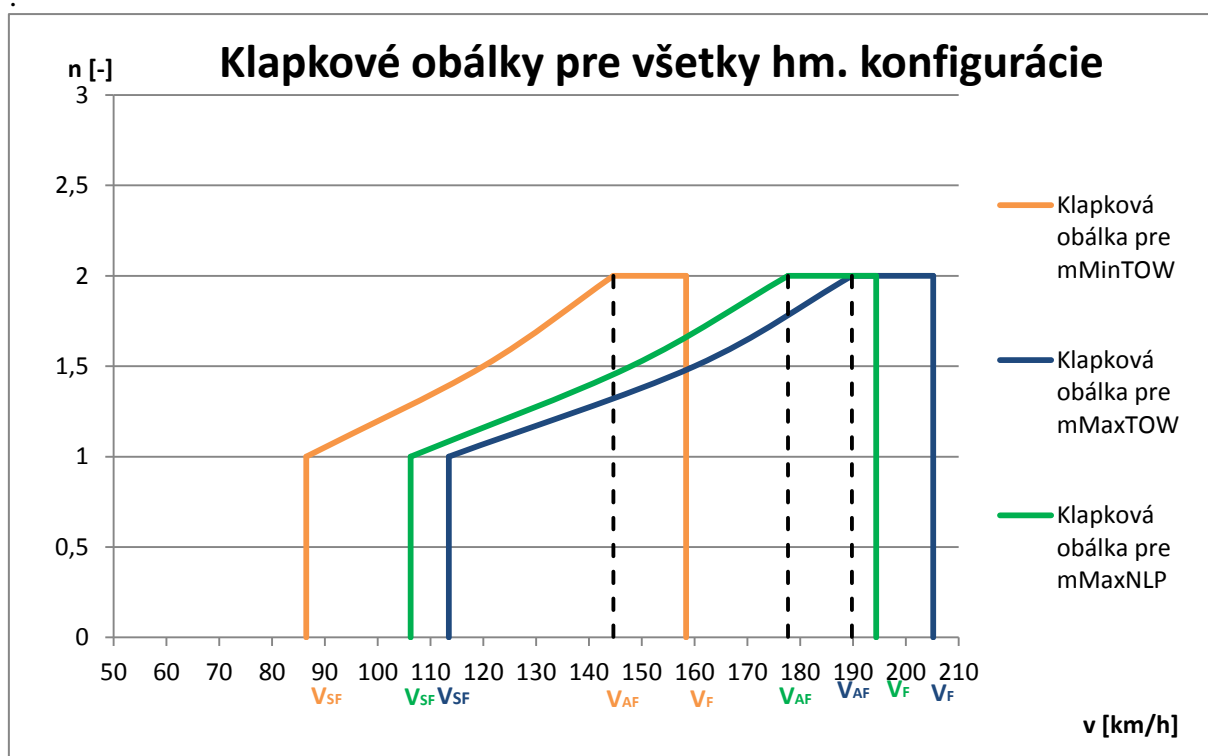
Volím rýchlosť $v_F = 194,4 \frac{km}{h}$

$$v_{AF} = v_{SmMaxNLP} \cdot \sqrt{n_K} = 49 \frac{m}{s} = 178 \frac{km}{h}$$

Tab. 8 Klapková obálka pre m_{MaxNLP}

| Klapková obálka pre m_{MaxNLP} | | | |
|---|---------------|--------|--------|
| Minimálna pádová rýchlosť s vysunutými klapkami | V_{SF} | [m/s] | 29,51 |
| | | [km/h] | 106,23 |
| Klapkový násobok podľa CS23.335 | n_K | [-] | 2 |
| $1,4 v_S$ | $V_{Fmin(1)}$ | [m/s] | 48,86 |
| | | [km/h] | 175,91 |
| $1,8 v_{SF}$ | $V_{Fmin(2)}$ | [m/s] | 53,11 |
| | | [km/h] | 191,21 |
| Uvažovaná rýchlosť podľa CS23.335 | V_F | [m/s] | 54,00 |
| | | [km/h] | 194,40 |
| Návrhová obratová rýchlosť letu s vysunutými klapkami | V_{AF} | [m/s] | 49 |
| | | [km/h] | 178 |

Grafické znázornenie klapkovej obálky je na obrázku číslo 6.



Obr. 6 Klapková obálka pre všetky hmotnostné konfigurácie

4.1.3 Poryvová obálka

V prípade poryvovej obálky zohráva hmotnostná konfigurácia významnú rolu a teda mení násobok zaťaženia pri poryvoch. Preto je nutné riešiť poryvovú obálku zvlášť pre každú hmotnostnú konfiguráciu. V tejto práci budú riešené tri reprezentatívne konfigurácie a to s maximálnou možnou vzletovou hmotnosťou, s minimálnou vzletovou hmotnosťou, s maximálnou hmotnosťou nevztlakových častí lietadla.

Predpis CS 23.341 definuje, že pokiaľ nie je racionálnejší postup výpočtu, použije sa uvedený postup.

Násobky zaťaženia pri maximálnej vzletovej hmotnosti (m_{MaxTOW})

Hmotnostný pomer letúna:

$$\mu_g = \frac{2 \cdot \frac{m_{MaxTOW} \cdot g}{S}}{\rho \cdot C_{SAT} \cdot \alpha_{kridla} \cdot g} = \frac{2 \cdot \frac{1550 \cdot 9,80665}{12,307}}{1,225 \cdot 1,192 \cdot 5,2794 \cdot 9,80665} = 32,587$$

Zmierňujúci poryvový súčiniteľ:

$$K_g = \frac{0,88 \cdot \mu_g}{5,3 + \mu_g} = \frac{0,88 \cdot 32,587}{5,3 + 32,587} = 0,757$$

Rýchlosť poryvu: Podľa CS - 23.333 (c) (1)

$$U_{devC} = 15,24 \text{ m/s}$$

$$U_{devD} = 7,62 \text{ m/s}$$

Násobky zaťaženia pri poryvoch:

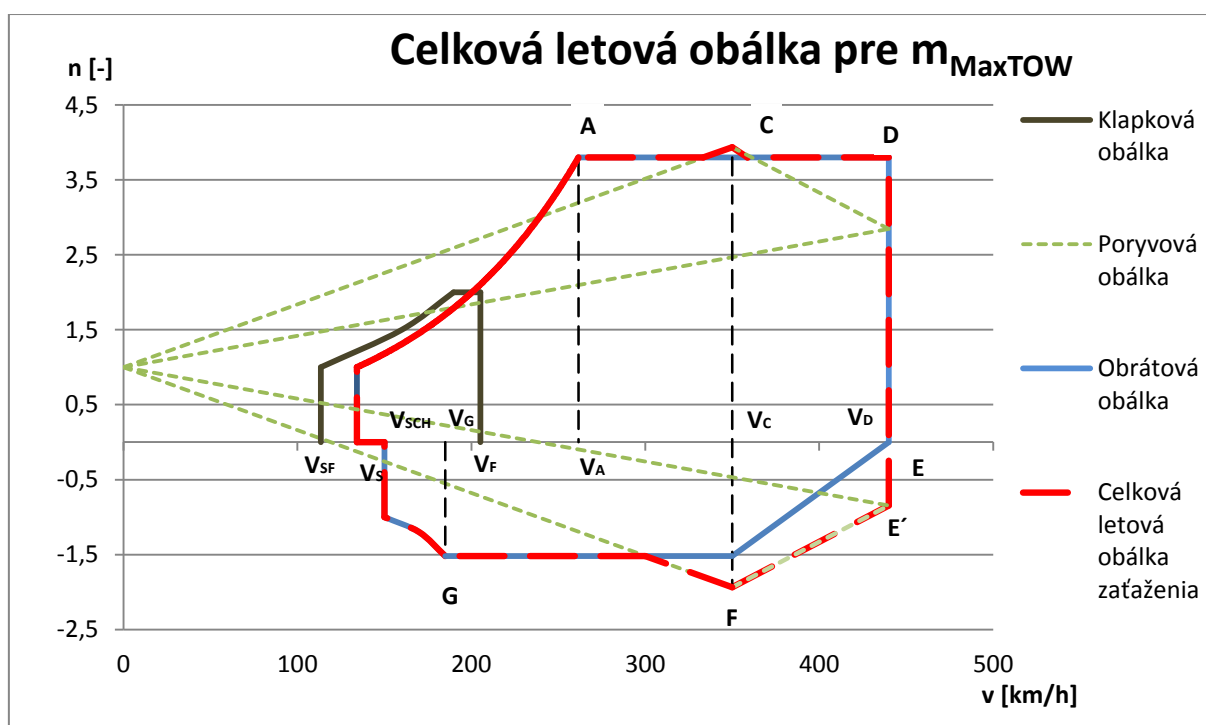
$$\begin{aligned} n_{v_{C+}} &= 1 + \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{devC} \cdot v_C \cdot \alpha_{kridla}}{2 \cdot \frac{m_{MaxTOW}}{S}} = 1 + \frac{0,757 \cdot 1,225 \cdot 15,24 \cdot \frac{350}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{1550 \cdot 9,80665}{12,307}} = 3,94 \\ n_{v_{C-}} &= 1 - \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{devC} \cdot v_C \cdot \alpha_{kridla}}{2 \cdot \frac{m_{MaxTOW}}{S}} = 1 - \frac{0,757 \cdot 1,225 \cdot 15,24 \cdot \frac{350}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{1550 \cdot 9,80665}{12,307}} = -1,94 \\ n_{v_{D+}} &= 1 + \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{devD} \cdot v_D \cdot \alpha_{kridla}}{2 \cdot \frac{m_{MaxTOW}}{S}} = 1 + \frac{0,757 \cdot 1,225 \cdot 7,62 \cdot \frac{430}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{1550 \cdot 9,80665}{12,307}} = 2,85 \\ n_{v_{D-}} &= 1 - \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{devD} \cdot v_D \cdot \alpha_{kridla}}{2 \cdot \frac{m_{MaxTOW}}{S}} = 1 - \frac{0,757 \cdot 1,225 \cdot 7,62 \cdot \frac{430}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{1550 \cdot 9,80665}{12,307}} = -0,85 \end{aligned}$$

Pre prehľadnosť sú vypočítané hodnoty uvedené v tabuľke č.9.

Tab. 9 Hodnoty pre poryvovú obálku hmotnostnej konfigurácie m_{MaxTOW}

| Letún s m_{MaxTOW} | | | |
|---|---------------|-------|-------|
| Hmotnostný pomer letúna | μ_g | [-] | 32,59 |
| Zmierňujúci poryvový súčiniteľ | Kg | [-] | 0,76 |
| Odvođená rýchlosť poryvu podľa CS23.333 | $U_{de_{vc}}$ | [m/s] | 15,24 |
| Odvođená rýchlosť poryvu podľa CS23.334 | $U_{de_{vd}}$ | [m/s] | 7,62 |
| Násobky zaťaženia pri poryvoch | | | |
| Kladný násobok pre cestovnú rýchlosť | n_{vc+} | [-] | 3,94 |
| Záporný násobok pre cestovnú rýchlosť | n_{vc-} | [-] | -1,94 |
| Kladný násobok pre rýchlosť strmhlav | n_{vd+} | [-] | 2,85 |
| Záporný násobok pre rýchlosť strmhlav | n_{vd-} | [-] | -0,85 |

Grafické znázornenie poryvovej obálky je na obrázku číslo 7. Rovnako na obrázku č. 7 je znázornená aj celková letová obálka pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxTOW} .


Obr. 7 Celková letová obálka pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxTOW}

Násobky zaťaženia pri minimálnej vzletovej hmotnosti (m_{MinTOW})

Hmotnostný pomer letúna:

$$\mu_g = \frac{2 \cdot \frac{m_{MinTOW} \cdot g}{S}}{\rho \cdot C_{SAT} \cdot \alpha_{kridla} \cdot g} = \frac{2 \cdot \frac{900 \cdot 9,80665}{12,307}}{1,225 \cdot 1,192 \cdot 5,2794 \cdot 9,80665} = 18,952$$

Zmierňujúci poryvový súčiniteľ:

$$K_g = \frac{0,88 \cdot \mu_g}{5,3 + \mu_g} = \frac{0,88 \cdot 32,587}{5,3 + 32,587} = 0,687$$

Rýchlosť poryvu: Podľa CS - 23.333 (c) (1)

$$U_{devC} = 15,24 \text{ m/s}$$

$$U_{devD} = 7,62 \text{ m/s}$$

Násobky zaťaženia pri poryvoch:

$$n_{vC+} = 1 + \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{devC} \cdot v_C \cdot \alpha_{kridla}}{2 \frac{m_{MinTOW}}{s}} = 1 + \frac{0,687 \cdot 1,225 \cdot 15,24 \cdot \frac{350}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{900 \cdot 9,80665}{12,307}} = 6,057$$

$$n_{vC-} = 1 - \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{devC} \cdot v_C \cdot \alpha_{kridla}}{2 \frac{m_{MinTOW}}{s}} = 1 - \frac{0,687 \cdot 1,225 \cdot 15,24 \cdot \frac{350}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{900 \cdot 9,80665}{12,307}} = -4,057$$

$$n_{vD+} = 1 + \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{devD} \cdot v_D \cdot \alpha_{kridla}}{2 \frac{m_{MinTOW}}{s}} = 1 + \frac{0,687 \cdot 1,225 \cdot 7,62 \cdot \frac{430}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{900 \cdot 9,80665}{12,307}} = 4,179$$

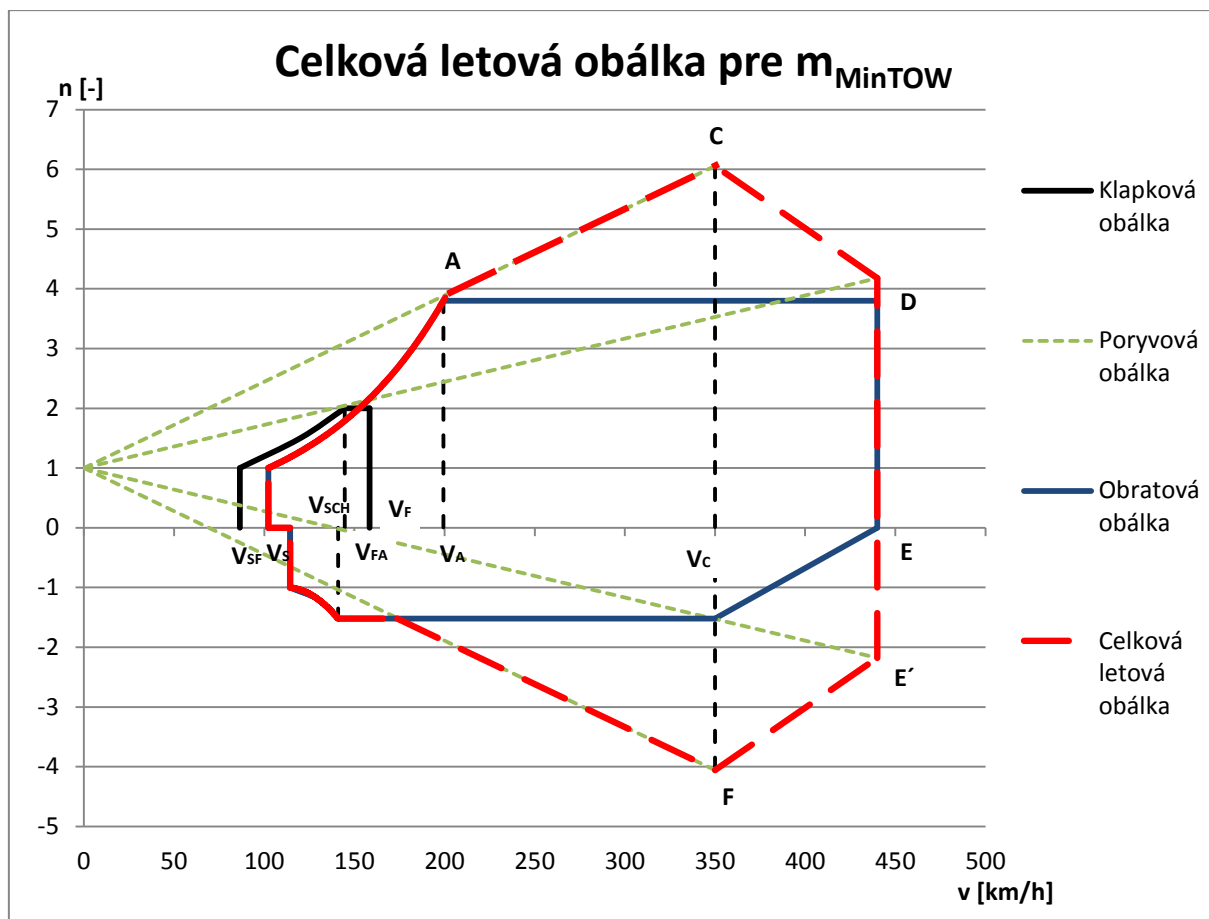
$$n_{vD-} = 1 - \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{devD} \cdot v_D \cdot \alpha_{kridla}}{2 \frac{m_{MinTOW}}{s}} = 1 - \frac{0,687 \cdot 1,225 \cdot 7,62 \cdot \frac{430}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{900 \cdot 9,80665}{12,307}} = -2,179$$

Pre prehľadnosť sú vypočítané hodnoty uvedené v tabuľke č.10.

Tab. 10 Hodnoty pre poryvovú obálku hmotnostnej konfigurácie m_{MinTOW}

| Letún s m_{MinTOW} | | | |
|---|------------|-------|--------|
| Hmotnostný pomer letúnu | μ_g | [-] | 18,925 |
| Zmierňujúci poryvový súčiniteľ | K_g | [-] | 0,687 |
| Odvozená rýchlosť poryvu podľa CS23.333 | U_{devC} | [m/s] | 15,240 |
| Odvozená rýchlosť poryvu podľa CS23.334 | U_{devD} | [m/s] | 7,620 |
| Násobky zaťaženia pri poryvoch | | | |
| Kladný násobok pre cestovnú rýchlosť | n_{vC+} | [-] | 6,057 |
| Záporný násobok pre cestovnú rýchlosť | n_{vC-} | [-] | -4,057 |
| Kladný násobok pre rýchlosť strmhlav | n_{vD+} | [-] | 4,179 |
| Záporný násobok pre rýchlosť strmhlav | n_{vD-} | [-] | -2,179 |

Grafické znázornenie poryvovej obálky je na obrázku číslo 8. Rovnako na obrázku č. 8 je znázornená i celková letová obálka pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MinTOW} .



Obr. 8 Celková letová obálka pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MinTOW}

Násobky zat'azenia pri maximálnej vzletovej hmotnosti nevztlakových častí letúna (m_{MaxNLP})

Z hmotnostného rozboru v kapitole 3 je možné definovať rozoberanú hmotnostnú konfiguráciu. Hmotnosť prázdneho lietadla bola určená ako 898,6 kg. Ďalej sa do tejto konfigurácie počítajú štyria pasažieri po maximálne 100 kg a batožina s hmotnosťou maximálne 60 kg. Z toho vyplýva, že hmotnosť lietadla v tejto konfigurácii je daná:

$$m_{MaxNLP} = m_{Prázdneho lietadla} + 4 \cdot m_{Max Pasažier} + m_{Max Batožiny} = 898,6 + 4 \cdot 100 + 60 = 1358,6 \text{ kg}$$

Hmotnostný pomer letúnu:

$$\mu_g = \frac{2 \cdot \frac{m_{MaxNLP} \cdot g}{S}}{\rho \cdot C_{SAT} \cdot \alpha_{kridla} \cdot g} = \frac{2 \cdot \frac{1358,6 \cdot 9,80665}{12,307}}{1,225 \cdot 1,192 \cdot 5,2794 \cdot 9,80665} = 28,568$$

Zmierňujúci poryvový súčiniteľ:

$$K_g = \frac{0,88 \cdot \mu_g}{5,3 + \mu_g} = \frac{0,88 \cdot 32,587}{5,3 + 32,587} = 0,742$$

Rýchlosť poryvu: Podľa CS - 23.333 (c) (1)

$$U_{dev_C} = 15,24 \text{ m/s}$$

$$U_{dev_D} = 7,62 \text{ m/s}$$

Násobky zaťaženia pri poryvoch:

$$n_{v_{C+}} = 1 + \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{dev_C} \cdot v_C \cdot \alpha_{kridla}}{2 \frac{m_{MaxNLP}}{s}} = 1 + \frac{0,742 \cdot 1,225 \cdot 15,24 \cdot \frac{350}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{1358,6 \cdot 9,80665}{12,307}} = 4,35$$

$$n_{v_{C-}} = 1 - \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{dev_C} \cdot v_C \cdot \alpha_{kridla}}{2 \frac{m_{MaxNLP}}{s}} = 1 - \frac{0,742 \cdot 1,225 \cdot 15,24 \cdot \frac{350}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{1358,6 \cdot 9,80665}{12,307}} = -2,35$$

$$n_{v_{D+}} = 1 + \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{dev_D} \cdot v_D \cdot \alpha_{kridla}}{2 \frac{m_{MaxNLP}}{s}} = 1 + \frac{0,742 \cdot 1,225 \cdot 7,62 \cdot \frac{430}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{1358,6 \cdot 9,80665}{12,307}} = 3,106$$

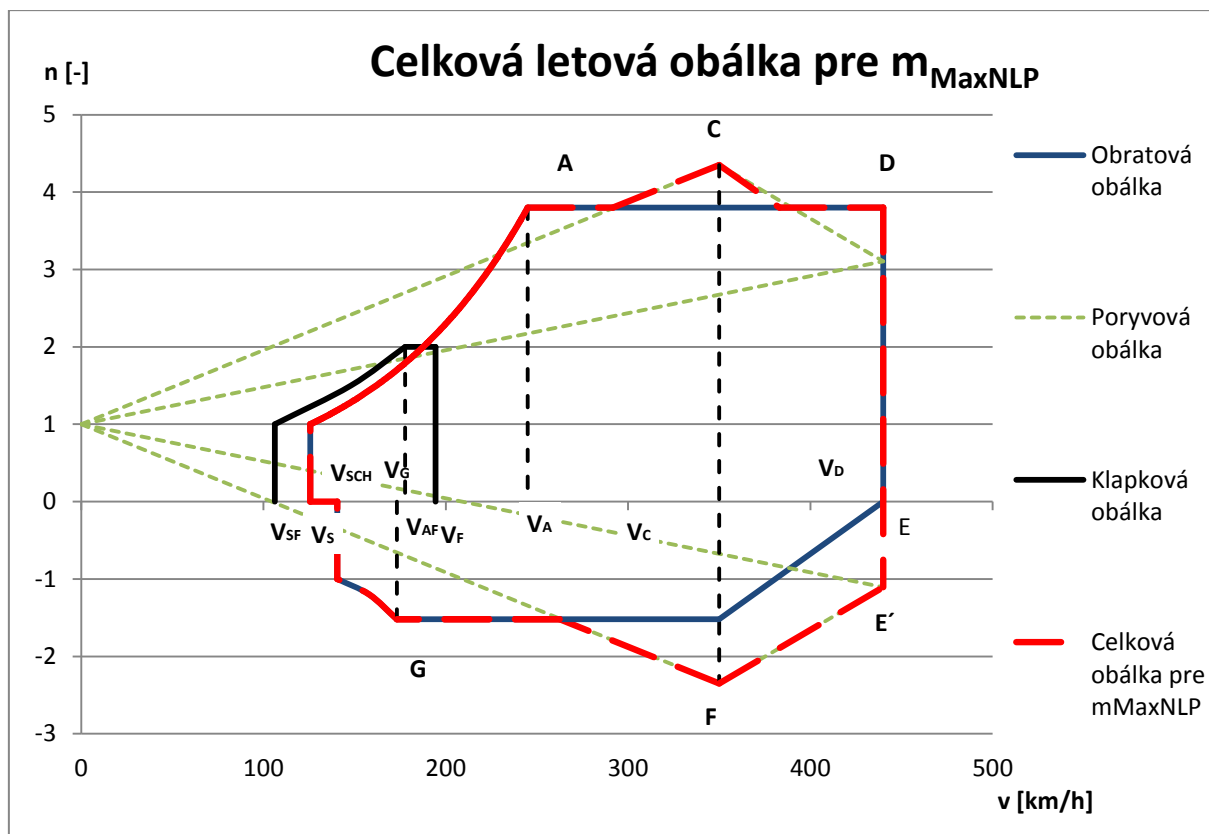
$$n_{v_{D-}} = 1 - \frac{K_g \cdot \rho \cdot U_{dev_D} \cdot v_D \cdot \alpha_{kridla}}{2 \frac{m_{MaxNLP}}{s}} = 1 - \frac{0,742 \cdot 1,225 \cdot 7,62 \cdot \frac{430}{3,6} \cdot 5,2794}{2 \cdot \frac{1358,6 \cdot 9,80665}{12,307}} = -1,106$$

Pre prehľadnosť sú vypočítané hodnoty uvedené v tabuľke č. 11.

Tab. 11 Hodnoty pre poryvovú obálku hmotnostnej konfigurácie m_{MaxNLP}

| Letún s m_{MaxNLP} | | | |
|---|--------------|-------|--------|
| Hmotnostný pomer letúna | μg | [-] | 28,568 |
| Zmierňujúci poryvový súčiniteľ | Kg | [-] | 0,742 |
| Odvedená rýchlosť poryvu podľa CS23.333 | U_{dev_C} | [m/s] | 15,240 |
| Odvedená rýchlosť poryvu podľa CS23.334 | U_{dev_D} | [m/s] | 7,620 |
| Násobky zaťaženia pri poryvoch | | | |
| Kladný násobok pre cestovnú rýchlosť | $n_{v_{C+}}$ | [-] | 4,350 |
| Záporný násobok pre cestovnú rýchlosť | $n_{v_{C-}}$ | [-] | -2,350 |
| Kladný násobok pre rýchlosť strmhlav | $n_{v_{D+}}$ | [-] | 3,106 |
| Záporný násobok pre rýchlosť strmhlav | $n_{v_{D-}}$ | [-] | -1,106 |

Grafické znázornenie poryvovej obálky je na obrázku číslo 9. Rovnako na obrázku č. 9 je znázornená aj celková letová obálka pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxNLP} .


Obr. 9 Celková letová obálka pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxNLP}

4.2 Zaťaženie krídla

Pre navrhnutie čo najvhodnejšej konštrukcie krídla a aj pre znalosť rozloženia síl na krídle je nutné vedieť zaťaženie krídla. Zaťaženie krídla je možné rozdeliť podľa základných princípov, ktoré ho produkujú. Delí sa na 4 najčastejšie druhy:

- Aerodynamické zaťaženie
- Zaťaženie od hmotových síl
- Zaťaženie od pohonnej skupiny
- Reakcie od zeme.

Nie na každom krídle sa vyskytujú všetky druhy zaťaženia, ale aerodynamické zaťaženie a zaťaženie od hmotnosti sa vyskytuje na každom. V krídle popísanom v tejto diplomovej práci sa nerozoberajú zaťaženia od pohonnej skupiny. Táto skupina je umiestnená v prednej časti lietadla a na krídlo nemá dôležitý vplyv. Rovnako sa nepočíta ani s reakciou od zeme, keďže podvozok lietadla nie je uchytený ku krídlu ale k trupu.

Účinkom každého zaťaženia na krídlo sú sily a momenty. Tieto sily sa navzájom sčítavajú a vytvárajú výsledný účinok zaťaženia, tj. tri momenty (M_x , M_y , M_z) a tri sily (T_x , T_y , T_z). Pri sčítaní zaťažení od jednotlivých druhov je nutné brať do úvahy zmysel pôsobenia síl a momentov. V rámci tejto diplomovej práce budú riešené len najpodstatnejšie účinky zaťaženia a to: krútiaci moment $M_y = M_K$, ohybový moment $M_x = M_o$ a posúvajúca sila $T_z = T$. [3],[1],[4]

Pri riešení zaťaženia sa vyskytujú pojmy, ktoré je dobré definovať. Prevádzkové zaťaženie je zaťaženie, ktoré sa na lietadle počas prevádzky môže vyskytnúť. Sú to hodnoty vo vnútri celkovej letovej obálky. Početné zaťaženie je zaťaženie vynásobené súčiniteľom bezpečnosti. Predpis CS 23.303 pojednáva o tom, že ak nebude dané inak, je súčiniteľ

bezpečnosti 1,5. V tejto práci sa bude počítať so súčiniteľom 2,25, keďže sa jedná o celokompozitové krídlo.

4.2.1 Prípady zaťaženia

Prípady zaťaženia sú body z obálky. Vyberajú sa tie najpodstatnejšie a teda najrozhodujúcejšie pre všetky uvažované hmotnostné konfigurácie. Po určení všetkých prípadov sa vyberú najreprezentatívnejšie, tie sa prepočítavajú až po súčiniteľ rezervy a zaradia sa do programu skúšky. [1]

4.2.1.1 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxTOW}

Voľba rozhodujúcich prípadov zaťaženia a príslušných hodnôt rýchlostí, násobkov a výchyliek krídeliek sú uvedené v tabuľke č.12 .

Tab. 12 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxTOW}

| | | Rýchlosť | | Odchýlka klapiek/ krídeliek | Násobok |
|---|-----------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------|
| Prípad zaťaženia | | [m.s ⁻¹] | [km.h ⁻¹] | [°] | [-] |
| Kladný obratový pri v_A | A | 72,67 | 261,6 | 0 | 3,80 |
| Kladný poryvový pri v_C | C | 97,2 | 350,0 | 0 | 3,94 |
| Kladný obratový pri v_D | D | 122,2 | 440,0 | 0 | 3,80 |
| Symetrický pri v_D | E' | 122,2 | 440,0 | 0 | 0,00 |
| Záporný poryvový pri v_D | E | 122,2 | 440,0 | 0 | -0,85 |
| Záporný poryvový pri v_C | F | 97,22 | 350,0 | 0 | -1,94 |
| Záporný obratový pri v_G | G | 51,4 | 185,0 | 0 | -1,52 |
| Kladný krídelkový pri v_A - výchylka dole | A_{kr+} | 72,7 | 261,6 | 16 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_A - výchylka hore | A_{kr-} | 72,7 | 261,6 | -24 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_C - výchylka dole | C_{kr+} | 97,2 | 350,0 | 11,96 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_C - výchylka hore | C_{kr-} | 97,2 | 350,0 | -17,94 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_D - výchylka dole | D_{kr+} | 122,2 | 440,0 | 3,17 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_D - výchylka hore | D_{kr-} | 122,2 | 440,0 | -4,76 | 2,53 |
| Klapkový pri v_{AF} | K_+ | 52,7 | 189,8 | 40 | 2,00 |

4.2.1.1 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MinTOW}

Voľba rozhodujúcich prípadov zaťaženia a príslušných hodnôt rýchlostí, násobkov a výchyliek krídeliek sú uvedené v tabuľke č.13.

Tab. 13 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MinTOW}

| Prípad zaťaženia | | Rýchlosť | | Odchýlka klapiek/ krídeliek | Násobok |
|---|-----------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------|
| | | [m.s ⁻¹] | [km.h ⁻¹] | [°] | [-] |
| Kladný obratový pri v_A | A | 72,7 | 261,6 | 0 | 3,80 |
| Kladný poryvový pri v_C | C | 97,2 | 350,0 | 0 | 6,06 |
| Kladný poryvový pri v_D | D | 122,2 | 440,0 | 0 | 4,18 |
| Symetrický pri v_D | E' | 122,2 | 440,0 | 0 | 0,00 |
| Záporný poryvový pri v_D | E | 122,2 | 440,0 | 0 | -2,18 |
| Záporný poryvový pri v_C | F | 97,2 | 350,0 | 0 | -4,06 |
| Záporný obratový pri v_G | G | 51,4 | 185,0 | 0 | -1,52 |
| Kladný krídelkový pri v_A - výchylka dole | A_{kr+} | 72,7 | 261,6 | 16 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_A - výchylka hore | A_{kr-} | 72,7 | 261,6 | -24 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_C - výchylka dole | C_{kr+} | 97,2 | 350,0 | 11,96 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_C - výchylka hore | C_{kr-} | 97,2 | 350,0 | -17,94 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_D - výchylka dole | D_{kr+} | 122,2 | 440,0 | 3,17 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_D - výchylka hore | D_{kr-} | 122,2 | 440,0 | -4,76 | 2,53 |
| Klapkový pri v_{AF} | K_+ | 52,7 | 189,8 | 40 | 2,00 |

4.2.1.1 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxNLP}

Voľba rozhodujúcich prípadov zaťaženia a príslušných hodnôt rýchlostí, násobkov a výchýliek krídeliek sú uvedené v tabuľke č.14.

Tab. 14 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxNLP}

| Prípad zaťaženia | | Rýchlosť | | Odchýlka klapiek/ krídeliek | Násobok |
|---|-----------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------|
| | | [m.s ⁻¹] | [km.h ⁻¹] | [°] | [-] |
| Kladný obratový pri v_A | A | 72,7 | 261,6 | 0 | 3,80 |
| Kladný poryvový pri v_C | C | 97,2 | 350,0 | 0 | 4,35 |
| Kladný obratový pri v_D | D | 122,2 | 440,0 | 0 | 3,80 |
| Symetrický pri v_D | E' | 122,2 | 440,0 | 0 | 0,00 |
| Záporný poryvový pri v_D | E | 122,2 | 440,0 | 0 | -1,11 |
| Záporný poryvový pri v_C | F | 97,2 | 350,0 | 0 | -2,35 |
| Záporný obratový pri v_G | G | 51,4 | 185,0 | 0 | -1,52 |
| Kladný krídelkový pri v_A - výchylka dole | A_{kr+} | 72,7 | 261,6 | 16 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_A - výchylka hore | A_{kr-} | 72,7 | 261,6 | -24 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_C - výchylka dole | C_{kr+} | 97,2 | 350,0 | 11,96 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_C - výchylka hore | C_{kr-} | 97,2 | 350,0 | -17,94 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_D - výchylka dole | D_{kr+} | 122,2 | 440,0 | 3,17 | 2,53 |
| Kladný krídelkový pri v_D - výchylka hore | D_{kr-} | 122,2 | 440,0 | -4,76 | 2,53 |
| Klapkový pri v_{AF} | K_+ | 52,7 | 189,8 | 40 | 2,00 |

4.2.2 Aerodynamické zaťaženie krídla

Pre výpočet aerodynamického zaťaženia krídla je nutné vedieť rozloženie vztľaku po krídle. Toto rozloženie je získané pomocou Glauertovej metódy, riešenou programom Glauert III. Grafické znázornenie rozloženia vztľaku pre konkrétne prípady a hmotnostné konfigurácie sú uvedené v Prílohe číslo 2.

Existujú tri prípady zaťaženia od aerodynamických síl. Symetrické, nesymetrické a klapkové. Nižšie uvedené vzťahy sú pre určenie celkového miestneho vztľaku v y-ovej vzdialenosti od stredu lietadla.

Pre symetrické prípady zaťaženia platí:

$$C_{Lc}(y) = C_{Lkr} \cdot C_{Ln}(y) + C_{L0}(y)$$

Pre nesymetrické prípady zaťaženia platí:

$$C_{Lc}(y) = C_{Lkr} \cdot C_{Ln}(y) + C_{L0}(y) + C_{Lkr \text{ Sym}}(y) + C_{Lkr \text{ Anti}}(y)$$

Pre klapkové prípady zaťaženia platí:

$$C_{Lc}(y) = C_{Lkr} \cdot C_{Ln}(y) + C_{L0}(y) + C_{Lkr \text{ Sym}}(y) \mp C_{Lkr \text{ Anti}}(y) + C_{L \text{ klapky}}$$

4.2.2.1 Vzťahy pre výpočet zaťaženia od aerodynamických síl

Pomocou uvedených vzťahov, výstupov z programu Glauert a programu Excel boli vypočítané priebehy posúvajúcej sily, ohybového momentu a krútiaceho momentu. Pri výpočtoch bola použitá lichobežníková numerická integrácia. Vzťahy sú platné pre všetky tri hmotnostné konfigurácie.

Symetrické prípady:

Líniové vztlakové zaťaženie:

$$q(y) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_{Lc}(y) \cdot C_{L0}(y)$$

Posúvajúca sila:

$$T(y) = \int_0^{\frac{b}{2}} q(y) dy$$

Ohybový moment:

$$Mo(y) = \int_0^{\frac{b}{2}} T(y) dy$$

Spojité moment k aerodynamickému strediu:

$$q_{Mk}(y) = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot c(y)^2 \cdot c_{m0}(y)$$

Krútiaci moment k aerodynamickému strediu:

$$Mk(y) = \int_0^{\frac{b}{2}} q_{Mk}(y) dy$$

Nesymetrické prípady:

Nesymetrické prípady, teda krídelkové majú pre výpočet spojitého krútiaceho momentu k aerodynamickému strediu odlišný vzťah ako v prípade symetrických prípadov. Až na túto výnimku sú postup a vzťahy totožné so symetrickými prípadmi.

Spojité moment k aerodynamickému strediu:

$$q_{Mk}(y) = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot c(y)^2 \cdot (C_{L0}(y) + k \cdot \delta_{KR}) \quad \text{kde } k = -0,01$$

Výchyľky krídeliek pre rýchlosť v_A :

$$\begin{aligned} \text{Dole:} \quad & \delta_{Akr+} = \delta_{maxkr+} \\ \text{Hore:} \quad & \delta_{Akr-} = \delta_{maxkr-} \end{aligned}$$

Výchyľky krídeliek pre rýchlosť v_C :

$$\begin{aligned} \text{Dole:} \quad \delta_{Ckr+} &= \delta_{Akr+} \cdot \frac{v_A}{v_C} \\ \text{Hore:} \quad \delta_{Ckr-} &= \delta_{Akr-} \cdot \frac{v_A}{v_C} \end{aligned}$$

Výchyľky krídeliek pre rýchlosť v_D :

$$\begin{aligned} \text{Dole:} \quad \delta_{Ckr+} &= \delta_{Akr+} \cdot \frac{v_A}{3 \cdot v_D} \\ \text{Hore:} \quad \delta_{Dkr-} &= \delta_{Akr-} \cdot \frac{v_A}{3 \cdot v_D} \end{aligned}$$

Násobok:

$$n = \frac{2}{3} \cdot n_{max}$$

Uvedené vzorce výchyľiek a násobkov sú číselne vyjadrené pre každú hmotnostnú konfiguráciu v príslušnej tabuľke prípadov (Tab. 11, Tab. 12, Tab. 13)

Klapkový prípad:

Rovnako ako pre nesymetrické prípady, tak aj pre klapkové prípady je jeden rozdiel vo výpočte zaťaženia od aerodynamických síl a to vo vzťahu pre výpočet spojitého momentu k aerodynamickému stredu:

$$q_{Mk}(y) = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot c(y)^2 \cdot (c_{L0}(y) + k \cdot \delta_{KL}) \quad \text{kde } k = -0,01$$

Výchyľka klapky ja braná ako maximálna výchyľka, a to 40° .

4.2.2.2 Vypočítané hodnoty aerodynamického zaťaženia

Tabuľky hodnôt posúvajúcich síl, ohybových momentov a krútiacich momentov v jednotlivých rezoch pre všetky hmotnostné konfigurácie a všetky uvažované prípady zaťaženia sú uvedené v prílohe číslo 3, kde sú tiež uvedené grafy závislosti vypočítaných síl na polrozpätí lietadla.

4.2.3 Zaťaženie krídla od zotrvačných síl

Na výpočet zaťaženia krídla od zotrvačných síl je možné využiť nižšie uvedené vzorce. Rozloženie je zistené za predpokladu priamej úmernosti veľkosti tetivy k hmotnosti a nepriamo k ploche krídla. Pre prípad m_{MaxTOW} je nutné zobrať do úvahy aj vplyv hmotnosti paliva v nádrži, ktoré je rozložené tiež na základe vyššie uvedeného princípu. Na výpočet integrácií je použitá numerická integrácia, konkrétne lichobežníková metóda.

Spojité zaťaženie:

Samotná hmotnosť prázdneho krídla má spojitý zaťaženie dané vzťahom:

$$q_{Zkr}(y) = \frac{m_{kr} \cdot g \cdot n \cdot c(y)}{S}$$

Príspevok ku zaťaženiu palivom je určený vzťahom:

$$q_{zpal}(y) = \frac{m_{pal} \cdot g \cdot n \cdot c(y)}{S_{pal}}$$

, kde S_{pal} je plocha krídla v mieste nádrže a počíta sa len v rezoch, kde sa vyskytuje nádrž

Spojité zaťaženie prázdneho krídla v nesymetrických prípadoch:

$$\text{Výchylka dole: } q_{zkr}(y) = \frac{m_{kr} \cdot g \cdot c}{S} \cdot \left(n + \frac{\varepsilon_x \cdot y}{g} \right)$$

$$\text{Výchylka hore: } q_{zkr}(y) = \frac{m_{kr} \cdot g \cdot c}{S} \cdot \left(n - \frac{\varepsilon_x \cdot y}{g} \right)$$

Príspevok ku zaťaženiu palivom je určený vzťahom:

$$\text{Výchylka dole: } q_{zpal}(y) = \frac{m_{pal} \cdot g \cdot c}{S_{pal}} \cdot \left(n + \frac{\varepsilon_x \cdot y}{g} \right)$$

$$\text{Výchylka hore: } q_{zpal}(y) = \frac{m_{pal} \cdot g \cdot c}{S_{pal}} \cdot \left(n - \frac{\varepsilon_x \cdot y}{g} \right)$$

, kde ε_x je uhlové zrýchlenie klopenia lietadla a rovnako sa rieši iba v rezoch, v ktorých sa nachádza nádrž

Posúvajúca sila od zotrvačných síl:

Posúvajúca sila od hmotnosti prázdneho krídla:

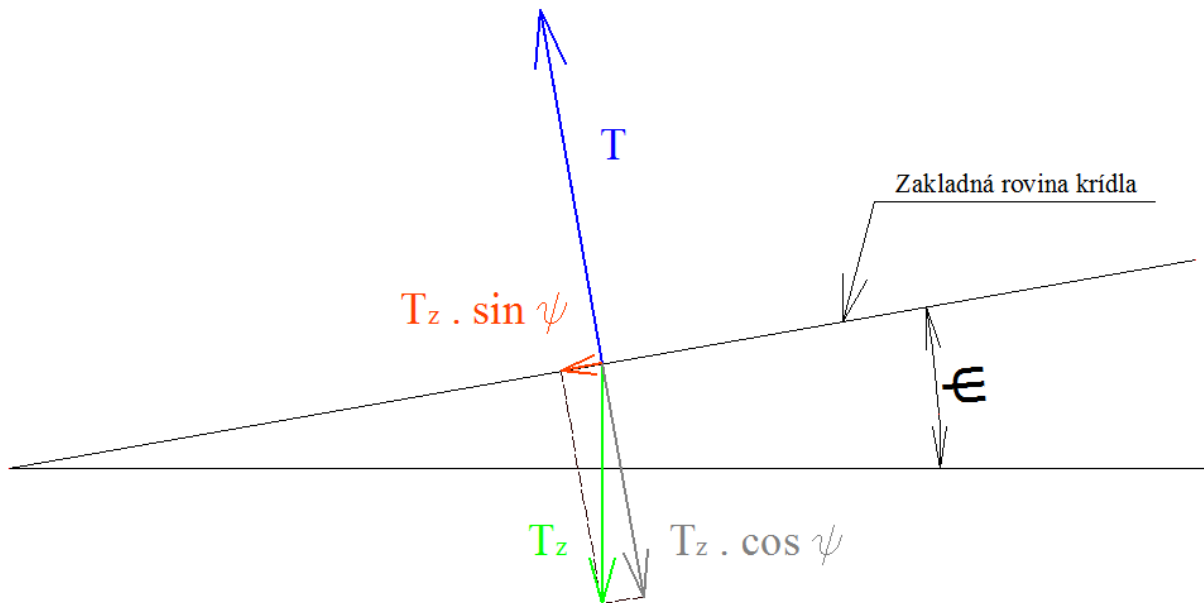
$$T_{zkr}(y) = \int_0^{\frac{b}{2}} q_{zkr}(y) dy$$

Posúvajúca sila od hmotnosti paliva:

$$T_{zpal}(y) = \int_0^{\frac{b}{2}} q_{zpal}(y) dy$$

Celková posúvajúca sila vznikajúca na krídle od zotrvačných síl:

Na rozdiel od aerodynamického zaťaženia je nutné v tomto prípade brať do úvahy aj vplyv vzopätia krídla ψ , obr. č.10.



Obr. 10 Vplyv vzopätia na krídlo

$$T_{Zcelk}(y) = T_{Zkr}(y) \cdot \cos \psi + T_{Zpal}(y) \cdot \cos \psi$$

, kde v prípade hmotnostných konfigurácií m_{MinTOW} a m_{MaxNLP} je $T_{Zpal}(y) = 0$

Ohybový moment od zotrvačných síl:

$$M_{Oz}(y) = \int_0^{\frac{b}{2}} T_{Zcelk}(y) dy$$

Krútiaci moment k aerodynamickému stredú:

Krútiaci moment daný samostatnou hmotnosťou prázdneho krídla:

$$Mk_{Zkr}(y) = \int_0^{\frac{b}{2}} q_{Zkr}(y) \cdot c(y) \cdot (x_{Tkr} - 0,25) dy$$

Krútiaci moment daný hmotnosťou paliva:

$$Mk_{Zpal}(y) = \int_0^{\frac{b}{2}} q_{Zpal}(y) \cdot c(y) \cdot (x_{Tpal} - 0,25) dy$$

Celkový krútiaci moment k aerodynamickému stredú:

$$Mk_{Zcelk}(y) = Mk_{Zkr}(y) + Mk_{Zpal}(y)$$

,kde v prípade hmotnostných konfigurácií m_{MinTOW} a m_{MaxNLP} je $Mk_{Zcelk}(y) = 0$

4.2.3.1 Vypočítané hodnoty zaťaženia od zotrvačných síl

Tabuľky hodnôt posúvajúcich síl, ohybových momentov a krútiacich momentov v jednotlivých rezoch pre všetky hmotnostné konfigurácie a všetky uvažované prípady

zaťaženia sú uvedené v Prílohe číslo 3, kde sú tiež uvedené grafy závislosti vypočítaných síl na polrozpätí lietadla.

4.2.4 Početné zaťaženie

Prevádzkové zaťaženie získame ako súčet aerodynamického zaťaženia a zaťaženia od zotrvačných síl. Platí to pre všetky tri zložky.

Posúvajúca sila:

$$T_c = T + T_{Zcelk}$$

Ohybový moment:

$$Mo_c = Mo + Mo_z$$

Krútiaci moment:

$$Mk_c = Mk + Mk_{Zcelk}$$

Pre výpočet je nutné vedieť početné zaťaženie., ktoré je dané vzťahmi

Posúvajúca sila:

$$T_{poc} = f \cdot T_c$$

Ohybový moment:

$$Mo_{poc} = f \cdot Mo_c$$

Krútiaci moment:

$$Mk_{poc} = f \cdot Mk_c$$

,kde f je volené v súlade s predpismi ako 2,25.

4.2.4.1 Vypočítané hodnoty početného zaťaženia

Tabuľky početných hodnôt posúvajúcich síl, ohybových momentov a krútiacich momentov v jednotlivých rezoch pre všetky hmotnostné konfigurácie a všetky uvažované prípady zaťaženia sú uvedené v Prílohe číslo 3, kde sú tiež uvedené grafy závislosti vypočítaných síl na polrozpätí lietadla.

5 Konštrukcia krídla

Krídlo je navrhnuté ako dvoj dutinové a dvojnosičkové. Oba nosníky sú kolmé na základnú rovinu krídla.

Predný nosník má tvar I profilu a vrátane krakorca je priamy až po vzdialenosť 4875 mm v y smere od roviny súmernosti lietadla. Táto nezalomená časť sa nachádza v 25% hĺbke profilu krídla v koreni krídla a v 25% hĺbky krídla v mieste zalomenia. Následne je nosník zalomený o 20° a takto zalomený pokračuje až po koniec krídla. Stojnu oboch častí tvorí sendvič pozostávajúci z penového jadra a potáhov z uhlíkových kompozitov s orientáciou vlákien $\pm 45^\circ$. Pásnice sú tvorené uhlíkovým rovingom.

Zadný nosník má tvar C je raz lomený v mieste koreňového rebra. Toto zalomenie je z dôvodu nutnosti rovnobežnosti krakorcov oboch nosníkov. Nosník je umiestnený v 72% tetivy profilu v koreni krídla a zároveň v 72% tetivy profilu krídla v mieste zalomenia prvého nosníka. Materiál použitý je totožný s materiálom predného nosníka.

Koreňové rebro je nosníkmi delené na tri samostatné časti. Materiál všetkých troch častí je navrhnutý ako uhlíkový kompozit. V stojnách rebra je použitá sendvičová konštrukcia, podobne ako v stojnách nosníkov.

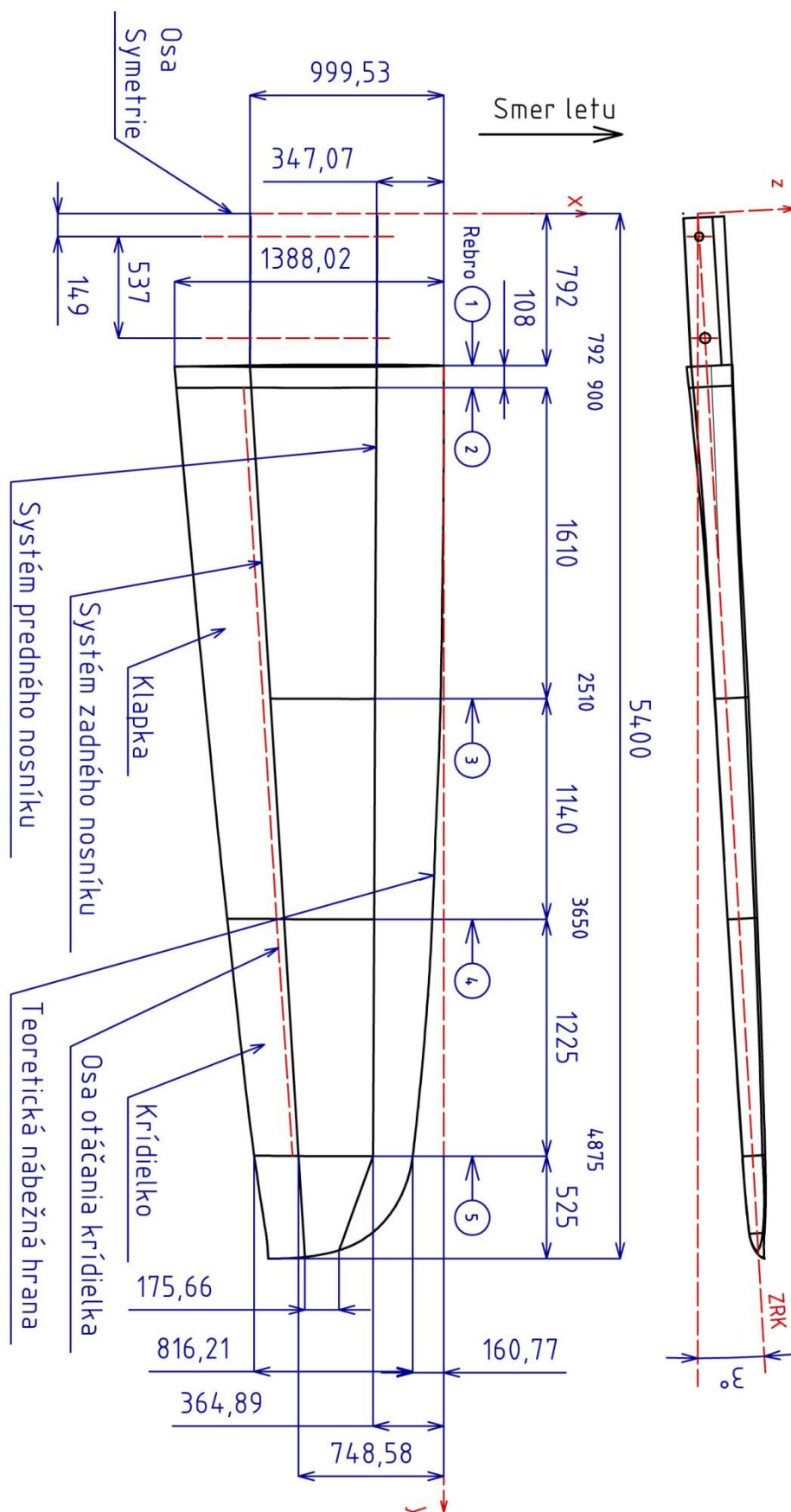
Vo vzdialenosti 3650 mm je navrhnuté rebro, ktoré slúži na uchytenie krídelka a klapky a prenosu síl od nich. Rebro pozostáva na rozdiel od koreňového rebra iba z dvoch častí umiestnených medzi nosníkmi a za zadným nosníkom. Rebro je navrhnuté z uhlíkového kompozitu s orientáciou vlákien $\pm 45^\circ$ v stojne.

V mieste zalomenia predného nosníka sa nachádza rebro na prenos síl spôsobených zalomením nosníka a zároveň na slúži na uchytenie krídelka. Rebro je umiestnené len medzi nosníkmi. Navrhnutý materiál je uhlíkový kompozit s orientáciou vlákien $\pm 45^\circ$.

Vo vzdialenosti 900 mm a 2510 mm sú navrhnuté dva rebrá medzi nosníkmi krídla, ktoré spolu s potahom a samotnými nosníkmi tvoria integrálnu palivovú nádrž.

Potáh krídla je navrhnutý zo sendviču. Tento sendvič pozostáva z penového jadra potáhu sendviču tvoreného uhlíkovým kompozitom s orientáciou vlákien $\pm 45^\circ$.

Pozície všetkých uvedených častí sú znázornené v systémovom výkrese krídla (obr. 11)



Obr. 11 Systémový výkres

6 Pevnostná analýza

Účelom pevnostnej analýzy je preukázať, že navrhnutá konštrukcia krídla je schopná preniesť maximálne početné zaťaženie krídla (v tejto kapitole sa používajú výhradne početné zaťaženia, tak pre zjednodušenie, ak nebude uvedené inak, sú ohybové, krútiace momenty a posúvajúce sily brané ako početné, a pritom nie sú označené indexom pocč). Zároveň je nutné navrhnuť konštrukciu tak, aby bola čo najľahšia a z toho dôvodu nesmie byť predimenzovaná. Obe tieto požiadavky je možné vyjadriť číselne pomocou súčiniteľa rezervy pre každý riešený konštrukčný prvok. Ideálny súčiniteľ rezervy má hodnotu 1 alebo o málo vyššiu než jeden. Žiaden súčiniteľ rezervy nesmie byť nižší než 1.

Pevnostná kontrola je v rámci tejto práce realizovaná v 10 rezoch, ktorých vzdialenosti v smere y sú uvedené v prvom stĺpci v tabuľke číslo 15.

Existujú dva kritické prípady zaťaženia krídla, ktoré môžu nastať:

- maximálny ohyb krídla
- maximálny krut krídla.

Maximálny ohyb krídla

Z vypočítaného zaťaženia krídla v kapitole 4 je možné určiť, kedy je ohybový moment najväčší. Tento prípad nastane v prípade kladného poryvu pri cestovnej rýchlosti v hmotnostnej konfigurácii m_{MaxNLP} , ktorý reprezentuje bod C v letovej obálke pre príslušnú hmotnostnú konfiguráciu. Tomuto bodu zodpovedá aj priebeh posúvajúcej sily a priebeh krútiaceho momentu, ktorý ale nie je maximálny. Hodnoty spomínaných veličín v kontrolovaných rezoch sú uvedené v tabuľke číslo 15.

Tab. 15 Priebeh početnej posúvajúcej sily , početného ohybového a krútiaceho momentu vo vybraných rezoch

| y | Mo | T | Mk |
|-------|-------|-------|-------|
| [m] | [Nm] | [N] | [Nm] |
| 4,875 | 473 | 2158 | -318 |
| 4,621 | 1208 | 3766 | -558 |
| 4,042 | 4628 | 8175 | -1228 |
| 3,65 | 7587 | 10831 | -1646 |
| 3,330 | 12689 | 14621 | -2258 |
| 2,510 | 28161 | 23346 | -3699 |
| 1,798 | 47938 | 32430 | -5148 |
| 1,195 | 70118 | 41292 | -6508 |
| 0,900 | 82987 | 45982 | -7213 |
| 0,792 | 88049 | 47744 | -7477 |

Maximálny krut krídla

Rovnako ako pri maximálnom ohybe krídla aj pre maximálny krut je možné určiť, pre tento rozhodujúci prípad, priebeh krútiaceho momentu z kapitoly 4. Maximálny krut nastane v prípade záporného poryvu pri rýchlosti strmhlavého letu v hmotnostnej konfigurácii

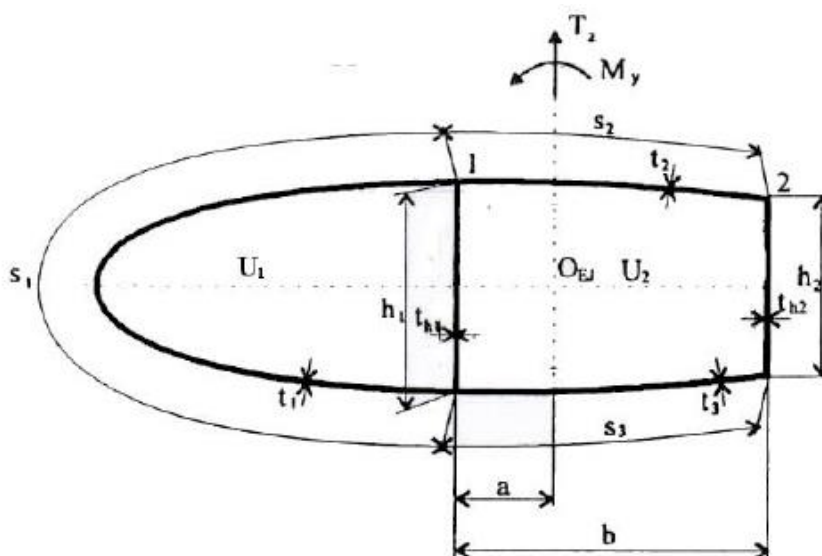
m_{MaxTOW} reprezentujúci bod E' letovej obálky pre príslušnú hmotnostnú konfiguráciu. Tomuto bodu zodpovedá aj priebeh posúvajúcej sily a priebeh ohybového momentu, ktoré ale nie sú maximálne, no nutné pre výpočet. Hodnoty spomínaných veličín v kontrolovaných rezoch sú uvedené v tabuľke 16..

Tab. 16 Priebeh početnej posúvajúcej sily , početného ohybového a krútiaceho momentu vo vybraných rezoch

| y | Mo | T | Mk |
|-------|--------|--------|--------|
| [m] | [Nm] | [N] | [Nm] |
| 4,875 | -271 | -1226 | -547 |
| 4,621 | -686 | -2118 | -961 |
| 4,042 | -2582 | -4484 | -2118 |
| 3,65 | -4189 | -5847 | -2841 |
| 3,330 | -6912 | -7707 | -3897 |
| 2,510 | -14736 | -11274 | -6435 |
| 1,798 | -23249 | -12442 | -9192 |
| 1,195 | -30757 | -12293 | -11780 |
| 0,900 | -34321 | -11848 | -13123 |
| 0,792 | -35597 | -11782 | -13604 |

6.1 Geometria

Rozmery dutín v konkrétnych rezoch boli odmerané na modely vytvorené pomocou programu CATIA. Tieto hodnoty sú uvedené v tabuľke číslo 17. Merané veličiny a ich označenie je viditeľné na obrázku číslo 12.



Obr. 12 Označenie veličín

Tab. 17 Geometria v rezoch

| y | h ₁ | h ₂ | U ₁ | U ₂ | s ₁ | s ₂ | s ₃ | l _{nos} |
|-------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| [m] | [mm] | [mm] | [m ²] | [m ²] | [m] | [m] | [m] | [mm] |
| 4,875 | 102,337 | 82,164 | 0,015 | 0,042 | 445,404 | 385,389 | 384,863 | 383,681 |
| 4,621 | 111,972 | 88,3 | 0,018 | 0,047 | 491,74 | 402,13 | 401,665 | 400,402 |
| 4,042 | 129,301 | 98,937 | 0,026 | 0,058 | 591,116 | 440,416 | 440,017 | 438,517 |
| 3,65 | 138,181 | 104,704 | 0,03 | 0,066 | 635,812 | 466,33 | 465,925 | 464,322 |
| 3,33 | 143,939 | 110,205 | 0,032 | 0,072 | 658,95 | 487,452 | 487,014 | 485,387 |
| 2,51 | 157,665 | 121,027 | 0,038 | 0,088 | 715,827 | 541,729 | 541,034 | 539,367 |
| 1,798 | 165,936 | 130,635 | 0,041 | 0,102 | 733,916 | 591,226 | 589,434 | 588,212 |
| 1,195 | 187,394 | 140,49 | 0,047 | 0,121 | 743,811 | 630,222 | 627,498 | 625,932 |
| 0,9 | 202,058 | 146,096 | 0,05 | 0,133 | 747,072 | 650,574 | 647,315 | 645,351 |
| 0,792 | 209,132 | 148,409 | 0,052 | 0,138 | 748,553 | 658,12 | 654,641 | 652,461 |

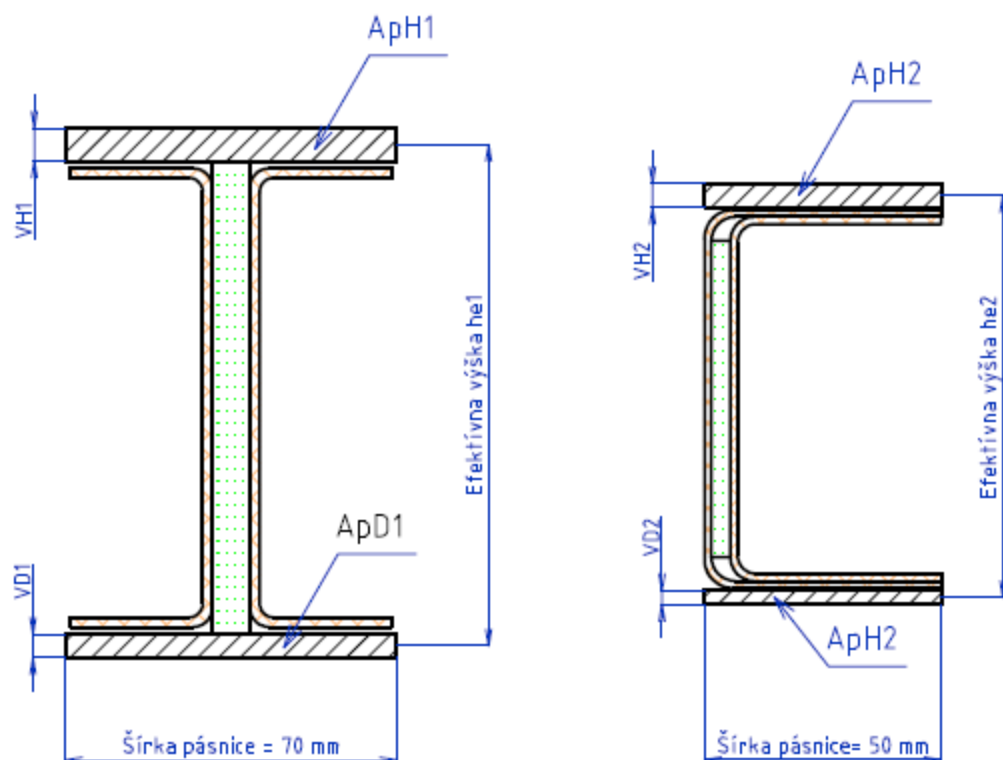
6.2 Pevnostná kontrola nosníku

Oba nosníky pozostávajú z troch častí:

- pásnice
- stojna
- krakorec

6.2.1 Pevnostná kontrola pásnic

Pásnice oboch nosníkov prenášajú ohybový moment pôsobiaci na krídlo. Spodné pásnice sú v prípade maximálneho ohybu krídla namáhané na ťah a vrchné na tlak. V prípade maximálneho krutu je to naopak, a teda horné sú namáhané na ťah a spodné na tlak. Ohybový moment sa od koreňa krídla k jeho koncu znižuje, preto sa budú znižovať aj plochy prierezov pásnic tak, aby bol súčiniteľ bezpečnosti čo najpriateľnejší. Šírka pásnic pre nosník sa po rozpätí krídla nemení. Pre predný nosník má tento parameter hodnotu 70 mm a zadný 50 mm. Meniť sa bude parameter výšky pásnice a jeho hodnoty sú uvedené v tabuľke číslo 1, v ktorej sú uvedené aj obsahy prierezov pásnic.



Obr. 13 Schéma predného nosníka a zadného nosníka

Tab. 18 Výšky a obsahy prierezov pásnic v jednotlivých rezoch

| y | V_{H1} | A_{pasH1} | V_{D1} | A_{pasD1} | V_{H2} | A_{pasH2} | V_{D2} | A_{pasD2} |
|-------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|
| [m] | [mm] | [mm ⁴] | [mm] | [mm ⁴] | [mm] | [mm ⁴] | [mm] | [mm ⁴] |
| 4,875 | 0,15 | 10,5 | 0,15 | 10,5 | 0,15 | 7,5 | 0,15 | 7,5 |
| 4,621 | 0,15 | 10,5 | 0,15 | 10,5 | 0,15 | 7,5 | 0,15 | 7,5 |
| 4,042 | 0,75 | 52,5 | 0,5 | 35 | 0,25 | 12,5 | 0,25 | 12,5 |
| 3,65 | 1 | 70 | 0,75 | 52,5 | 0,5 | 25 | 0,5 | 25 |
| 3,33 | 1,5 | 105 | 1,25 | 87,5 | 0,5 | 25 | 0,5 | 25 |
| 2,51 | 3,5 | 245 | 2,75 | 192,5 | 0,5 | 25 | 0,5 | 25 |
| 1,798 | 5 | 350 | 4 | 280 | 1,25 | 62,5 | 1,25 | 62,5 |
| 1,195 | 7 | 490 | 6 | 420 | 1,5 | 75 | 1,5 | 75 |
| 0,9 | 7,5 | 525 | 6 | 420 | 1,5 | 75 | 1,5 | 75 |
| 0,792 | 7,5 | 525 | 6 | 420 | 2 | 100 | 1 | 50 |

Uvedený postup výpočtu je totožný pre oba riešené prípady, a preto uvedené vzťahy platia pre oba prípady. Výnimkou je vzťah pre výpočet súčiniteľa bezpečnosti, ktorý bude pre maximálny ohyb a krut uvedený zvlášť. Výpočet je uskutočnený v programe Excel.

Na prenose ohybového momentu sa podieľajú oba nosník priamo úmerne ohybovým tuhostiam pásnic EJ. Index i je platný pre celý výpočet pevnostnej kontroly, kde 1 predstavuje predný nosník a 2 predstavuje zadný nosník.

Kvadratický moment jednotlivých prierezov nosníkov je vypočítaný pomocou vzorca:

$$J_i = \frac{A_{pasHi} + A_{pasDi}}{A_{pasHi} \cdot A_{pasDi}} \cdot h_{ei}^2$$

Hodnoty kvadratických momentov sú uvedené v tabuľke č. 19.

Tab. 19 Kvadratické momenty jednotlivých prierezov

| y | J ₁ | J ₂ |
|-------|--------------------|--------------------|
| [m] | [mm ⁴] | [mm ⁴] |
| 4,875 | 48573 | 21668 |
| 4,621 | 58791 | 25307 |
| 4,042 | 316037 | 53693 |
| 3,65 | 517238 | 120550 |
| 3,33 | 890101 | 134434 |
| 2,51 | 2378513 | 163955 |
| 1,798 | 3758277 | 475746 |
| 1,195 | 6917574 | 663238 |
| 0,9 | 8362088 | 720332 |
| 0,792 | 8998708 | 661845 |

Ohybový moment pôsobiaci na jednotlivý nosník:

$$Mo_i = \frac{J_i \cdot E_i \cdot Mo}{E_1 J_1 + J_2 E_2}$$

Sily v pásniciach:

$$N_i = \frac{Mo_i}{h_{ei}}$$

Namáhanie v horných pásniciach:

$$\sigma_{Hi} = \frac{N_i}{A_{pashi}}$$

Namáhanie v dolných pásniciach:

$$\sigma_{Di} = \frac{N_i}{A_{pashi}}$$

Číselné vyjadrenia ohybových momentov, síl v pásniciach a napätí v pásniciach sú uvedené v Prílohe číslo 4.

Materiál pásnic je navrhnutý ako uhlíkový roving ktorý má maximálne dovolené napätie v tlaku $\sigma_{Dov t} = 800 \text{ MPa}$ a maximálne dovolené napätie v ťahu $\sigma_{Dov d} = 1000 \text{ MPa}$.

Pre prípad maximálneho ohybu budú platiť iné vzťahy pre výpočet súčiniteľu bezpečnosti ako pre prípad maximálneho krutu. Je to spôsobené opačným zmyslom ohýbania krídla pre tento prípad. Vzťah pre výpočet rezervy pre prípad maximálneho ohybu:

$$\eta_{Di} = \frac{\sigma_{Dov d}}{\sigma_{Di}}$$

$$\eta_{Hi} = \frac{\sigma_{Dov tah}}{\sigma_{Hi}}$$

Vzťah pre výpočet rezervy pre prípad maximálneho ohybu:

$$\eta_{Di} = \frac{\sigma_{Dov tah}}{\sigma_{Di}}$$

$$\eta_{Hi} = \frac{\sigma_{Dov d}}{\sigma_{Hi}}$$

Hodnoty jednotlivých súčiniteľov rezervy pre pásnice sú uvedené v tabuľke číslo 20.

Tab. 20 Súčinitele rezervy pásnic pri maximálnom ohybe krídla

| y | η_{H1} | η_{D1} | η_{H2} | η_{D2} |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| [m] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 4,875 | 2,47 | 3,09 | 3,12 | 3,90 |
| 4,621 | 1,05 | 1,32 | 1,36 | 1,70 |
| 4,042 | 1,30 | 1,09 | 1,38 | 1,72 |
| 3,65 | 1,20 | 1,12 | 1,37 | 1,71 |
| 3,33 | 1,04 | 1,08 | 1,25 | 1,56 |
| 2,51 | 1,11 | 1,09 | 1,26 | 1,58 |
| 1,798 | 1,02 | 1,02 | 1,15 | 1,43 |
| 1,195 | 1,07 | 1,15 | 1,30 | 1,63 |
| 0,9 | 1,04 | 1,04 | 1,26 | 1,58 |
| 0,792 | 1,01 | 1,01 | 1,87 | 1,17 |

Tab. 21 Súčinitele rezervy pásnic pri maximálnom krute krídla

| y | η_{H1} | η_{D1} | η_{H2} | η_{D2} |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| [m] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 4,875 | 5,40 | 4,32 | 6,83 | 5,46 |
| 4,621 | 2,32 | 1,85 | 2,99 | 2,39 |
| 4,042 | 2,92 | 1,56 | 3,09 | 2,47 |
| 3,65 | 2,71 | 1,62 | 3,10 | 2,48 |
| 3,33 | 2,39 | 1,59 | 2,86 | 2,29 |
| 2,51 | 2,64 | 1,66 | 3,01 | 2,41 |
| 1,798 | 2,64 | 1,69 | 2,95 | 2,36 |
| 1,195 | 3,05 | 2,09 | 3,71 | 2,97 |
| 0,9 | 3,15 | 2,01 | 3,82 | 3,05 |
| 0,792 | 3,11 | 1,99 | 5,78 | 2,31 |

6.2.2 Pevnostná kontrola stojny

Stojna prenáša posúvajúcu silu pôsobiacu na krídlo a vytvára v nej šmykový tok ghi . Stojna sa tiež spolu s poťahom podieľa na prenose krútiaceho momentu, ktorý vytvára v stojne šmykový tok gi . Výsledný šmykový tok je daný súčtom šmykových tokov pôsobiacich na stojnu.

6.2.2.1 Šmykové toky v stojnách od posúvajúcich síl

Posúvajúca sila sa prenáša rovnako ako ohybový moment na nosníky priamo úmerne ich ohybovým tuhostiam EJ . Uvedený postup výpočtu je totožný pre oba riešené prípady, a preto uvedené vzťahy platia pre oba prípady. Výpočet bol realizovaný v programe Excel.

$$T_i = \frac{J_i \cdot E_i \cdot T}{E_1 J_1 + J_2 E_2}$$

Šmykový tok v stojne predného a zadného nosníka:

$$q_{hi} = \frac{T_i}{h_{e1}}$$

Tab. 22 Šmykové toky v stojnách nosníkov od posúvajúcej sily pri maximálnom ohybe krídla

| y | q _{h1} | q _{h2} |
|-------|----------------------|----------------------|
| [m] | [Nmm ⁻¹] | [Nmm ⁻¹] |
| 4,875 | 14,58 | 8,10 |
| 4,621 | 23,51 | 12,84 |
| 4,042 | 54,04 | 12,00 |
| 3,65 | 63,57 | 19,55 |
| 3,33 | 88,25 | 17,41 |
| 2,51 | 138,53 | 12,44 |
| 1,798 | 173,48 | 27,89 |
| 1,195 | 201,07 | 25,71 |
| 0,9 | 209,52 | 24,96 |
| 0,792 | 210,85 | 24,58 |

Tab. 23 Šmykové toky v stojnách nosníkov od posúvajúcej sily pri maximálnom krute krídla

| y | q _{h1} | q _{h2} |
|-------|----------------------|----------------------|
| [m] | [Nmm ⁻¹] | [Nmm ⁻¹] |
| 4,875 | -8,28 | -4,60 |
| 4,621 | -13,22 | -7,22 |
| 4,042 | -29,64 | -6,58 |
| 3,65 | -34,32 | -10,56 |
| 3,33 | -46,52 | -9,18 |
| 2,51 | -66,90 | -6,01 |
| 1,798 | -66,56 | -10,70 |
| 1,195 | -59,86 | -7,66 |
| 0,9 | -53,98 | -6,43 |
| 0,792 | -52,03 | -6,07 |

6.2.2.2 Šmykové toky v stojnách od krútiaceho momentu

Pre určenie šmykových tokov vstupujúcich do stojny od krútiaceho momentu je nutné v prvom kroku prepočítať krútiaci moment k aerodynamickému stredu, získaný z výpočtu zaťaženia na krútiaci moment k elastickej osi. Uvedený postup výpočtu je totožný pre oba riešené prípady, a preto uvedené vzťahy platia pre oba prípady. Výpočet bol realizovaný v programe Excel.

Vzdialenosť ohybovo elastickej osi k prednému nosníku je daná vzťahom:

$$a = b \cdot \frac{E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2}$$

kde b je vzdialenosť medzi nosníkmi

Krútiaci moment k elastickej ose:

$$Mk_{EO} = M_K = 2,25 \cdot [Mk_{AS} + T \cdot (x_{EO} - x_{AS}) + Tz \cdot (x_{Taž} - x_{EO})]$$

kde je:

-poloha ohybovo elastickej osi od nábežnej hrany

$$x_{EO} = 0,25 \cdot c + a$$

-poloha pôsobiska aerodynamických síl:

$$x_{AS} = 0,25 \cdot c$$

-poloha ťažiska:

$$x_{Taž} = 0,47 \cdot c$$

Následne využitím Bredtovho vzťahu a pretvárnej podmienky sú vypočítané šmykové toky v jednotlivých dutinách. Pretvárna podmienka je založená na tom, že skrut jednej dutiny musí na základe spojitosti konštrukcie byť rovnaký ako skrut druhej dutiny.

Bredtov vzťah:

$$M_K = 2U_1q_1 + 2U_2q_2$$

Pretvarná podmienka:

$$\frac{1}{2 \cdot U_1} \int \frac{q_v}{G \cdot t} \cdot ds = \frac{1}{2 \cdot U_2} \int \frac{q_v}{G \cdot t} \cdot ds$$

Šmykový tok v prvej dutine:

$$q_1 = \frac{\frac{M_K s_2 U_1}{2U_2^2 t_2 G} + \frac{M_K s_3 U_1}{2U_2^2 G t_3} + \frac{M_K h_2 U_1}{2U_2^2 G t_{h2}} + \frac{q_{h2} h_2 U_1}{G t_{h2} U_2} + \frac{M_K h_1 U_1}{2G t_{h1} U_2^2} - \frac{q_{h1} h_1 U_1}{G t_{h1} U_2} - \frac{q_{h1} h_1}{G t_{h1}} + \frac{M_K h_1}{2G t_{h1} U_2}}{\frac{s_1}{G t_1} + \frac{h_1}{G t_{h1}} + \frac{U_1 h_1}{G t_{h1} U_2} + \frac{U_1^2 s_2}{U_2^2 G t_2} + \frac{U_1^2 s_3}{U_2^2 G t_3} + \frac{U_1^2 h_2}{U_2^2 G t_{h2}} + \frac{U_1^2 h_1}{G t_{h1} U_2^2} + \frac{h_1 U_1}{G t_{h1} U_2}}$$

Šmykový tok v druhej dutine:

$$q_2 = \frac{Mk_{EO} - 2 \cdot U_1 \cdot q_1}{2 \cdot U_2}$$

Tab. 24 Šmykové toky v prvej a druhej dutine od krútiaceho momentu pre prípad maximálneho ohybu krídla

| y | q ₁ | q ₂ |
|-------|----------------------|----------------------|
| [m] | [Nmm ⁻¹] | [Nmm ⁻¹] |
| 4,875 | -1,99 | -0,04 |
| 4,621 | -3,12 | 0,09 |
| 4,042 | -9,35 | -1,90 |
| 3,65 | -6,29 | -2,39 |
| 3,33 | -10,08 | -4,69 |
| 2,51 | -28,04 | -4,19 |
| 1,798 | -23,46 | -5,15 |
| 1,195 | -34,72 | -3,87 |
| 0,9 | -38,00 | -3,79 |
| 0,792 | -39,05 | -3,55 |

Tab. 25 Šmykové toky v prvej a druhej dutine od krútiaceho momentu pre prípad maximálneho krutu krídla

| y | q ₁ | q ₂ |
|-------|----------------------|----------------------|
| [m] | [Nmm ⁻¹] | [Nmm ⁻¹] |
| 4,875 | -3,76 | -6,89 |
| 4,621 | -5,87 | -10,69 |
| 4,042 | -8,45 | -16,93 |
| 3,65 | -12,15 | -19,89 |
| 3,33 | -14,05 | -24,24 |
| 2,51 | -35,17 | -23,36 |
| 1,798 | -32,07 | -35,97 |
| 1,195 | -35,43 | -37,53 |
| 0,9 | -36,01 | -37,95 |
| 0,792 | -36,10 | -37,62 |

6.2.2.3 Výsledné šmykové toky v stojnách nosníkov

Výsledný šmykový tok v stojnách je rovný súčtu šmykových tokov od posúvajúcej sily a od krútiaceho momentu. V prípade prvého nosníka tento súčet vyjadruje vzťah:

$$q_{v1} = q_{s1} + q_1 - q_2$$

V prípade druhého nosníka:

$$q_{v2} = q_{h1} + q_2$$

Tab. 26 Výsledné šmykové toky v stojnách pre prípad maximálneho ohybu krídla

| y | q _{v1} | q _{v2} |
|-------|----------------------|----------------------|
| [m] | [Nmm ⁻¹] | [Nmm ⁻¹] |
| 4,875 | 15,98 | 10,19 |
| 4,621 | 20,31 | 12,92 |
| 4,042 | 46,59 | 10,10 |
| 3,65 | 67,63 | 19,40 |
| 3,33 | 82,86 | 12,72 |
| 2,51 | 114,68 | 8,25 |
| 1,798 | 155,17 | 22,75 |
| 1,195 | 170,22 | 21,84 |
| 0,9 | 175,30 | 21,17 |
| 0,792 | 175,36 | 21,03 |

Tab. 27 Výsledné šmykové toky v stojnách pre prípad maximálneho krutu krídla

| y | q _{v1} | q _{v2} |
|-------|----------------------|----------------------|
| [m] | [Nmm ⁻¹] | [Nmm ⁻¹] |
| 4,875 | -5,16 | -11,49 |
| 4,621 | -8,41 | -17,90 |
| 4,042 | -21,17 | -23,51 |
| 3,65 | -26,58 | -30,45 |
| 3,33 | -36,34 | -33,41 |
| 2,51 | -78,70 | -29,37 |
| 1,798 | -62,66 | -46,67 |
| 1,195 | -57,77 | -45,19 |
| 0,9 | -52,05 | -44,38 |
| 0,792 | -50,51 | -43,69 |

6.2.2.4 Súčinitele rezervy stojny

Stojna je zo sendvičovej konštrukcie. Jadro tvorí 8 mm hrubá pena z materiálu Divinycell, ktorá má veľmi nízku maximálnu dovolenú pevnosť v šmyku, preto sa predpokladá, že sa nepodieľa na prenose zaťaženia. Poťah sendviču tvorí uhlíkový kompozit (160 g/mm²) s vláknami +- 45°, vždy s rovnakým počtom vrstiev na oboch poťahoch. Tento uhlíkový kompozit má maximálnu dovolenú pevnosť v šmyku $\tau_{DOV\ SMYK} = 100\ MPa$ a hrúbku jednej vrstvy $t_{vrstvy} = 0,26\ mm$. Vzťah pre maximálne dovolené šmykové napätie:

$$q_{Dov\ šmyk\ s\ i} = \tau_{Dov\ šmyk} \cdot n_{is} \cdot t_{vrstvy}$$

kde:

n_{is} – je počet vrstiev

Šmykový tok nie je rovnaký v každom reze. Na základe tejto skutočnosti bol zvolený počet vrstiev kompozitu na stojnu tak, aby bol súčiniteľ rezervy čo najpriateľnejší.

$$\eta_{is} = \frac{q_{Dov\ šmyk\ s\ i}}{q_{vi}}$$

Tab. 28 Počet vrstiev a súčiniteľ rezervy únosnosti stojny pre prípad maximálneho ohybu krídla

| | 1. Nosník | | 2. Nosník | |
|-------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| y | n_{1s} | η_{1s} | n_{2s} | η_{2s} |
| [m] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 4,875 | 2 | 4,12 | 2 | 6,45 |
| 4,621 | 2 | 2,56 | 2 | 4,02 |
| 4,042 | 2 | 1,12 | 2 | 5,15 |
| 3,65 | 4 | 1,74 | 2 | 3,03 |
| 3,33 | 4 | 1,26 | 2 | 4,09 |
| 2,51 | 6 | 1,36 | 2 | 6,30 |
| 1,798 | 8 | 1,34 | 2 | 2,29 |
| 1,195 | 8 | 1,22 | 2 | 2,38 |
| 0,9 | 8 | 1,19 | 2 | 2,46 |
| 0,792 | 8 | 1,19 | 2 | 2,47 |

Tab. 29 Počet vrstiev a súčiniteľ rezervy únosnosti stojny pre prípad maximálneho krutu krídla

| | 1. Nosník | | 2. Nosník | |
|-------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| y | n_{1s} | η_{1s} | n_{2s} | η_{2s} |
| [m] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 4,875 | 2 | 10,1 | 2 | 4,52 |
| 4,621 | 2 | 6,2 | 2 | 2,90 |
| 4,042 | 2 | 2,5 | 2 | 2,21 |
| 3,65 | 4 | 3,9 | 2 | 1,71 |
| 3,33 | 4 | 2,9 | 2 | 1,56 |
| 2,51 | 6 | 2,0 | 2 | 1,77 |
| 1,798 | 8 | 3,3 | 2 | 1,11 |
| 1,195 | 8 | 3,6 | 2 | 1,15 |
| 0,9 | 8 | 4,0 | 2 | 1,17 |
| 0,792 | 8 | 4,1 | 2 | 1,19 |

Keďže konštrukcia krídla musí s určitou odolnosťou odolať obom zaťaženiám, je nutné voliť počet vrstiev tak, aby vyhovoval v oboch prípadoch zaťaženia krídla. Z toho vyplýva, že súčiniteľ rezervy je v jednom prípade čo najbližšie číslu jedna a v druhom prípade, ktorý zaťažuje menej daný prvok konštrukcie, je mnohonásobne vyšší. Zaťaženie posledných dvoch rezov (4621 a 4875) je natoľko malé, že aj minimálny počet vrstiev dokáže preniesť zaťaženie.

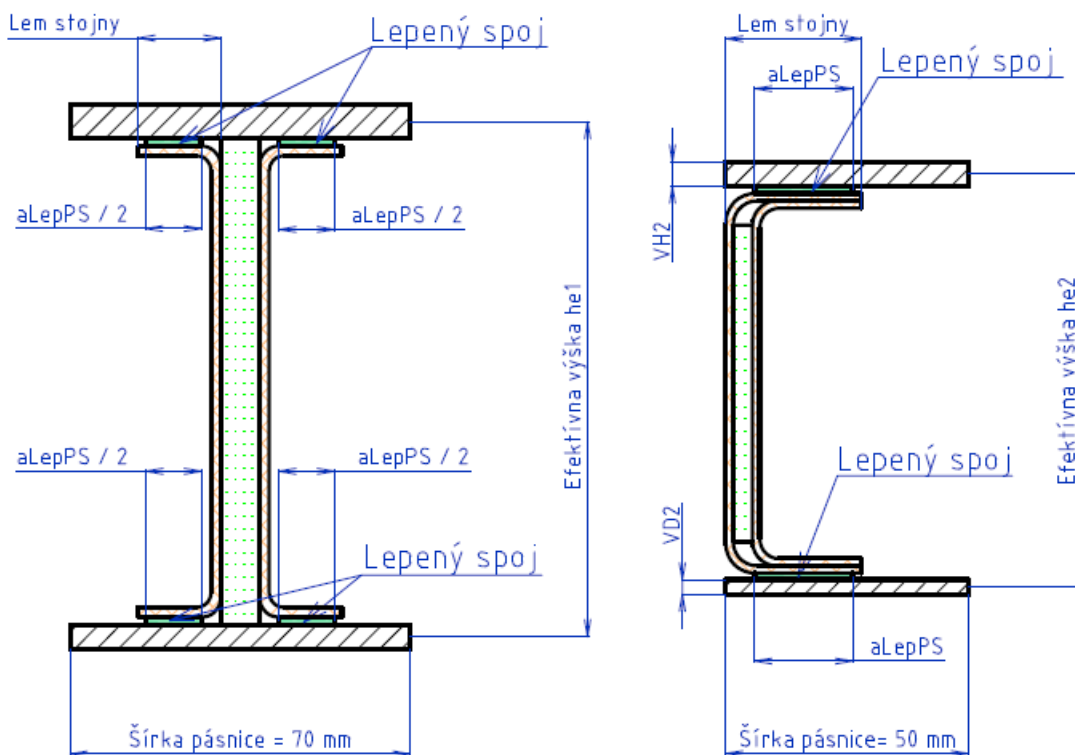
6.2.3 Pevnostná kontrola lepeného spoja pásnice a stojny

Šmykový tok zo stojny sa podľa vety o združených šmykových napätiach prenesie aj do časti $a_{LepPS\ i}$ vid' obr. 14, kde je realizovaný lepený spoj stojny a pásnice. Lepený spoj je navrhnutý uskutočniť pomocou epoxidového lepidla AV 5308 + HV 5309-1 tvrdnúceho pri izbovej teplote. Maximálna dovolená pevnosť lepidla v šmyku je $\tau_{Dov\ šmyk\ Lep} = 18\text{ MPa}$. Maximálny šmykový tok prenesený lepidlom je daný vzťahom platným pre oba riešené prípady zaťaženia krídla:

$$q_{Dov\ šmyk\ Lep\ i} = \tau_{Dov\ šmyk\ Lep} \cdot a_{LepPS\ i}$$

Súčiniteľ rezervy lepeného spoja:

$$\eta_{iLep\ SP} = \frac{q_{Dov\ šmyk\ Lep\ i}}{q_{vi}}$$



Obr. 14 Schéma lepených spojov

Tab. 30 Rozmery lepených spojov a príslušné súčinitele rezervy pre prípad max. ohybu

| | 1. Nosník | | 2. Nosník | |
|-------|----------------|-------------------|----------------|----------------|
| y | $a_{LepPS\ 1}$ | $\eta_{1Lep\ PS}$ | $a_{LepPS\ 2}$ | $H_{2Lep\ PS}$ |
| [m] | [mm] | [-] | [mm] | [-] |
| 4,875 | 3 | 4,28 | 2 | 4,46 |
| 4,621 | 3 | 2,66 | 2 | 2,79 |
| 4,042 | 4 | 1,55 | 2 | 3,56 |
| 3,65 | 4 | 1,51 | 3 | 3,15 |
| 3,33 | 5 | 1,09 | 3 | 4,24 |
| 2,51 | 7 | 1,10 | 3 | 6,55 |
| 1,798 | 9 | 1,04 | 4 | 3,17 |
| 1,195 | 10 | 1,06 | 4 | 3,30 |
| 0,9 | 10 | 1,03 | 4 | 3,40 |
| 0,792 | 10 | 1,03 | 5 | 4,28 |

Tab. 31 Rozmery lepených spojov a príslušné súčinitele rezervy pre prípad max. krutu

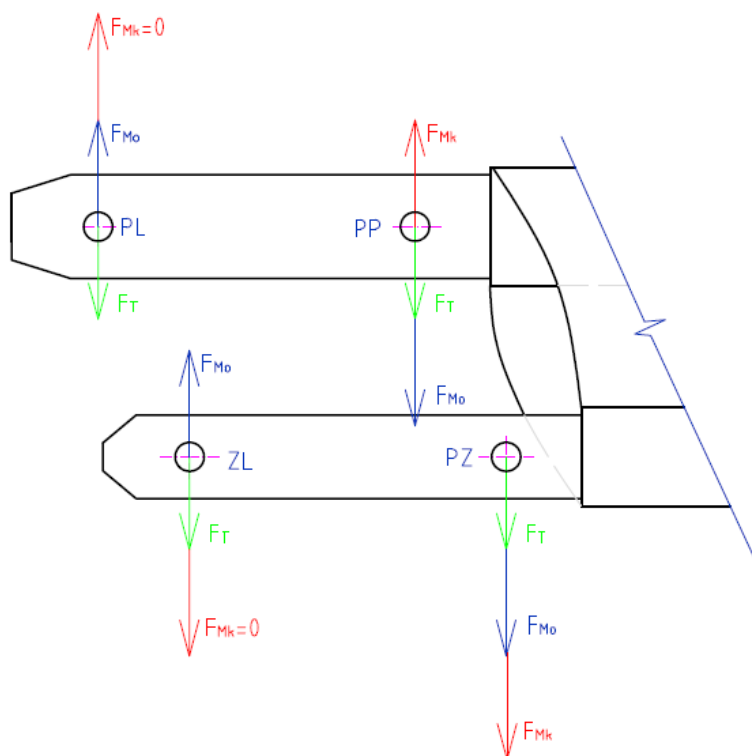
| | 1. Nosník | | 2. Nosník | |
|-------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| y | $a_{LepPS\ 1}$ | $\eta_{1Lep\ PS}$ | $a_{LepPS\ 2}$ | $\eta_{1Lep\ PS}$ |
| [m] | [mm] | [-] | [mm] | [-] |
| 4,875 | 3 | 10,47 | 2 | 3,13 |
| 4,621 | 3 | 6,42 | 2 | 2,01 |
| 4,042 | 4 | 3,40 | 2 | 1,53 |
| 3,65 | 4 | 3,39 | 3 | 1,77 |
| 3,33 | 5 | 2,48 | 3 | 1,62 |
| 2,51 | 7 | 1,60 | 3 | 1,84 |
| 1,798 | 9 | 2,59 | 4 | 1,54 |
| 1,195 | 10 | 3,12 | 4 | 1,59 |
| 0,9 | 10 | 3,46 | 4 | 1,62 |
| 0,792 | 10 | 3,56 | 5 | 2,06 |

Vhodnou voľbou šírky lepeného spoja $a_{LepPS\ i}$ v každom reze je možné dosiahnuť čo najpriateľnejšieho súčiniteľa rezervy. Pri voľbe šírky je treba brať ohľad na oba prípady zaťaženia. Veľkosť lemu stojny sa od koreňa krídla po koniec krídla mení adekvátne šírke lepeného spoja.

6.2.4 Pevnostná kontrola krakorcov

Oba nosníky sú zakončené krakorcami obdĺžnikového prierezu, ktoré prenášajú všetky zaťaženia do trupu lietadla. Prenos do trupu je zabezpečený štyrmi čapmi, ktoré prechádzajú cez krakorec zalaminovanou vložkou. Na obr. 15 je viditeľné schematické označenie každého čapu, síl a smerov síl, ktoré vyvoláva ohybový moment (F_{Mo}), posúvajúce sily (F_T)

a krútiaci moment (F_{Mk}). Krútiaci moment prenášajú len pravé čapy oboch nosníkov (PP a PZ).



Obr. 15 Rozloženie síl na krakorcach a označenie dier na čapy

Celkový ohybový moment sa rozdelí medzi krakorce na základe pomeru ich ohybových tuhostí. Index k nadobúda označenie P (predný) a Z (zadný).

$$Mo_i = \frac{J_i \cdot E_i \cdot Mo_{Max}}{E_P J_P + J_Z E_Z}$$

Sila od krútiaceho momentu na čap:

$$F_{Mo i} = \frac{Mo_i}{l_{\text{čapov}}}$$

Sila od posúvajúcich síl:

$$F_{T i} = \frac{J_i \cdot E_i \cdot T_{Max}}{E_P J_P + J_Z E_Z}$$

Sila od krútiaceho momentu:

$$F_{Mk i} = \frac{Mk_{max i}}{l_{krak}}$$

Kde:

- l_{krak} je vzdialenosť medzi krakorcami krídla

Výsledné sily na jednotlivý čap:

$$F_{PP} = -F_{MoP} - F_{Tp} + F_{Mkp}$$

$$F_{PL} = F_{MoP} - F_{Tp}$$

$$F_{ZP} = -F_{MoZ} - F_{Tz} - F_{Mkp}$$

$$F_{Zl} = F_{MoZ} - F_{Tz}$$

Šmykové porušenie krakorca (index j reprezentuje pozíciu na krakorci- P –napravo, L- naľavo):

$$\tau_{krak\ smyk\ ij} = \frac{T_{ij}}{n_{krak\ i} \cdot t_{vrstvy} \cdot e_{krak}}$$

kde: $n_{krak\ i}$ – je počet vrstiev na krakorci

Materiál použitý na krakorec je totožný s materiálom použitým na stojnu a má maximálnu dovolenú šmykovú pevnosť $\tau_{Dov\ šmyk} = 100\ MPa$. Hrúbka vrstvy je $t_{vrstvy} = 0,26\ mm$.

Súčiniteľ rezerv:

$$\eta_{krak\ smyk\ ij} = \frac{\tau_{Dov\ šmyk}}{\tau_{krak\ smyk\ ij}}$$

Kontrola na odtlačenie:

$$\sigma_{krak\ Otl} = \frac{T_{ij}}{n_{krak\ i} \cdot t_{vrstvy} \cdot d_{\xi\ ij}}$$

Tab. 32 Volba vrstiev a priemerov čapov a k nim vypočítané súčinitele rezervy pre jednotlivé čapy pre prípad maximálneho ohybu krídla

| ij | d_{ξ} | $\eta_{KraKOtl}$ | n_{krak} | $\eta_{KraKsmyk}$ |
|-----|-----------|------------------|------------|-------------------|
| [-] | [mm] | [-] | [-] | [-] |
| PP | 70 | 1,74 | 52 | 1,00 |
| PL | 70 | 2,91 | 52 | 1,68 |
| ZP | 25 | 5,92 | 8 | 1,46 |
| ZL | 25 | 9,92 | 8 | 2,45 |

Tab. 33 Volba vrstiev a priemerov čapov a k nim vypočítané súčinitele rezervy pre jednotlivé čapy pre prípad maximálneho ohybu krídla

| ij | d_{ξ} | $\eta_{KraKOtl}$ | n_{krak} | $\eta_{KraKsmyk}$ |
|-----|-----------|------------------|------------|-------------------|
| [-] | [mm] | [-] | [-] | [-] |
| PP | 70 | 6,42 | 52 | 3,71 |
| PL | 70 | 8,39 | 52 | 4,84 |
| ZP | 25 | 22,04 | 8 | 5,44 |
| ZL | 25 | 28,66 | 8 | 7,08 |

6.3 Pevnostná kontrola potáhu

Potáhu je väčšinou tvorený sendvičovou konštrukciou. Iba v mieste nábežnej hrany je konštrukcia potáhu bez jadra. Vo zvyšku potáhu je použitá pena Divinycell H60 o hrúbke 8 mm. V mieste spoja nosníka a potáhu je výška peny zmenšená na 3 mm z dôvodu zvýšenia efektívnej výšky nosníkov. Potáhy sendvičov sú z uhlíkového kompozitu (98g/m^2) s orientáciou vlákien $+45^\circ$. Hrúbka jednej vrstvy $t_{vrstvy} = 0,15\text{ mm}$.

Maximálny dovolený šmykový tok od krutu v jednej vrstve je zistený na základe skúšky vykonanej v skúšobni Leteckého ústavu VUT Brno. Jeho hodnota je $q_{DOV\text{ SMYK } K} = 60,44\text{ n/mm}$

Zaťaženie krídla spôsobuje jedine namáhanie krídla krútiacim momentom. Šmykové toky v jednotlivých dutinách boli určené v kapitole 6.2.2.2 a číselne vyjadrené v tabuľke číslo 24 a 25.

Šmykový tok nie je rovnaký v každom reze. Na základe tejto skutočnosti boli volený počet vrstiev kompozitu na potáhu tak, aby bol súčiniteľ rezervy čo najpriateľnejší.

Súčiniteľ rezervy je daný vzťahom, ktorý je platný pre oba skúšané prípady:

$$\eta_{ipot} = \frac{q_{Dov\text{ šmyk } K i}}{q_{vi}}$$

Tab. 34 Počet vrstiev a súčiniteľ rezervy únosnosti potáhu pre prípad maximálneho ohybu krídla

| | 1. Dutina | | 2. Dutina | |
|-------|------------|---------------|------------|---------------|
| y | n_{1pot} | η_{1pot} | n_{2pot} | η_{2pot} |
| [m] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 4,875 | 2 | 30,39 | 2 | 1607,08 |
| 4,621 | 2 | 19,35 | 2 | 708,70 |
| 4,042 | 2 | 6,47 | 2 | 31,85 |
| 3,65 | 2 | 9,61 | 2 | 25,30 |
| 3,33 | 2 | 6,00 | 2 | 12,90 |
| 2,51 | 6 | 2,16 | 2 | 14,42 |
| 1,798 | 6 | 2,58 | 4 | 11,75 |
| 1,195 | 8 | 1,74 | 5 | 15,60 |
| 0,9 | 8 | 1,59 | 5 | 15,96 |
| 0,792 | 8 | 1,55 | 5 | 17,00 |

Tab. 35 Počet vrstiev a súčiniteľ rezervy únosnosti potáhu pre prípad maximálneho ohybu krídla

| | 1. Dutina | | 2. Dutina | |
|-------|------------|---------------|------------|---------------|
| y | n_{1pot} | η_{1pot} | n_{2pot} | η_{2pot} |
| [m] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 4,875 | 2 | 16,05 | 2 | 8,77 |
| 4,621 | 2 | 10,29 | 2 | 5,66 |
| 4,042 | 2 | 7,15 | 2 | 3,57 |
| 3,65 | 2 | 4,98 | 2 | 3,04 |
| 3,33 | 2 | 4,30 | 2 | 2,49 |
| 2,51 | 6 | 1,72 | 2 | 2,59 |
| 1,798 | 6 | 1,88 | 4 | 1,68 |
| 1,195 | 8 | 1,71 | 5 | 1,61 |
| 0,9 | 8 | 1,68 | 5 | 1,59 |
| 0,792 | 8 | 1,67 | 5 | 1,61 |

Od rezu 3,33 sú šmykové toky natoľko malé, že aj minimálne množstvo vrstiev kompozitového sendviču preniesie toto zaťaženie so súčiniteľom rezervy 2,49 a viac pre oba riešené prípady.

Vrstvenie potáhu je podľa nasledujúceho poradia. V koreni krídla je počet vrstiev v druhej dutine vo vonkajšom potáhu sendviča rovný dvom a vnútorný rovný trom vrstvám. V prvej dutine sú štyri vrstvy z vonkajšej strany a štyri z vnútornej. V reze 1195 mm sa vynechá jedna vrstva z oboch strán potáhu sendviča prvej dutiny. Vo vzdialenosti 2510 mm sa v prvej dutine vynechá po dvoch vrstvách z oboch potáhov sendviča. Podobne sa vynechá po jednej vrstve z každej strany aj v druhej dutine vo vzdialenosti 1798 mm.

6.4 Pevnostná kontrola koreňového rebra

Koreňové rebro je delené nosníkmi na tri samostatné časti a je podobne ako stojna zadného nosníka riešené ako kompozitový sendvič. Potáhy sendviču sú tvorené z uhlíkového kompozitu (160g/m^2) o hrúbke vrstvy $t_{vrstvy} = 0,26\text{ mm}$ a s maximálnym dovoleným šmykovým napätím $\tau_{DOV\text{ SMYK}} = 100\text{ MPa}$.

Šmykové napätie v rebre:

$$\tau_{i\text{ Reb}} = \frac{q_i}{n_{i\text{ Reb}} \cdot t_{vrstvy}}$$

Súčiniteľ rezervy:

$$\eta_{i\text{ Reb}} = \frac{\tau_{DOV\text{ SMYK}}}{\tau_{i\text{ Reb}}}$$

Tab. 36 Súčinitele rezervy koreňového rebra

| | Maximálny ohyb krídla | Maximálny krut krídla |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Súčiniteľ rezervy rebra 1. dutiny | 1,33 | 2,88 |
| Súčiniteľ rezervy rebra 2. dutiny | 14,63 | 2,76 |

6.4.1 Kontrola lepených spojov koreňového rebra

Lepený tok prenáša šmykový tok medzi potahom a rebrom. Lepený spoj je realizovaný epoxidovým lepidlom AV 5308 + HV 5309-1 tvrdnúcim pri izbovej teplote. Maximálna dovolená pevnosť lepidla v šmyku je $\tau_{Dov\ šmyk\ Lep} = 18\text{ MPa}$. Maximálny šmykový tok prenesený lepidlom je daný vzťahom platným pre oba riešené prípady zaťaženia krídla:

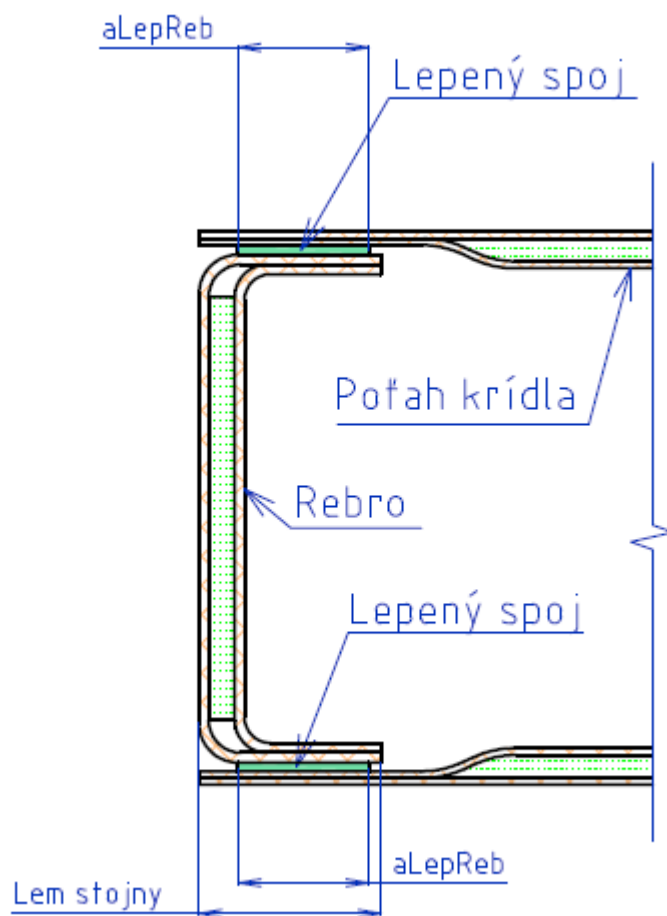
$$q_{Dov\ šmyk\ Lep\ i} = \tau_{Dov\ šmyk\ Lep} \cdot a_{Lep\ RP\ i}$$

Súčiniteľ rezervy lepeného spoja rebra a potahu:

$$\eta_{iLep\ RP} = \frac{q_{Dov\ šmyk\ Lep\ i}}{q_i}$$

Súčiniteľ rezervy lepeného spoja rebra a stojny:

$$\eta_{iLep\ RP} = \frac{q_{Dov\ šmyk\ Lep\ i}}{q_{vi}}$$



Obr. 16 Lepený spoj, rebro, potah (RP)

Tab. 37 Súčinitele rezervy lepených spojov koreňového rebra

| Lepený spoj | Maximálny ohyb krídla | Maximálny krut krídla |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Rebro prvej dutiny a potahu | 1,38 | 1,50 |
| Rebro prvej dutiny a stojny | 1,03 | 3,56 |
| Rebro druhej dutiny a potahu | 15,19 | 1,44 |
| Rebro druhej dutiny a stojny | 2,57 | 1,24 |

Prijateľné súčinitele boli volené správnou šírkou lepeného spoja a k tomu adekvátne veľkou šírkou lemu rebra. Lepený spoj rebra prvej dutiny a potahu, rebra druhej dutiny a potahu a rebra druhej dutiny a zadnej stojny je navrhnutý so šírkou 3 mm. Šírka lepeného spoja rebier s prednou stojnou je 10 mm.

7 Statická skúška krídla

Predpis 23.641 stanovuje, že pevnosť krídla musí byť overená statickou skúškou, alebo kombináciou statickej skúšky a pevnostnej analýzy.

Na vyvodenie zaťaženia čo najviac podobnému celkovému vypočítanému zaťaženiu sa v praxi využívajú dva spôsoby:

1. Priame zaťažovanie konštrukcie kalibrovanými závažiami
2. Zaťažovanie vahadlovými systémami.

Priame zaťažovanie konštrukcie kalibrovanými závažiami

Zaťaženie je vyvolávané pomocou kalibrovaných závaží vo forme pláténých vreciek obsahujúcich broky z olova alebo liatiny. V prípade nutnosti väčších váh sú závažia v tvare hranolu alebo kotúčov.

V prospech tohto spôsobu je jeho jednoduchosť pre rôznorodé zaťaženia a zároveň je dostatočne presný. V neprospech je nutnosť fyzickej námahy a celkový dlhší čas skúšky. Náročné je hľadanie prvej poruchy a pripevňovania mechanických tenzometrov. Veľkou nevýhodou je aj nemožnosť rýchleho odľahčenia konštrukcie.

Zaťažovanie vahadlovými systémami

Zaťaženie je vyvolané pomocou hydraulického zariadenia alebo žeriavu. Táto sila je rozdelená cez vahadlový systém takým spôsobom, aby sa sila rozdelila do bodov tak, aby čo najvernejšie kopírovala vypočítané zaťaženie. Uchytenie ku skúšanému vzorku môže byť realizované pomocou prilepenia ražného plátna alebo pomocou klieštín. Výhodou tohto spôsobu je možnosť rýchleho a jednoduchého odľahčenia a viditeľnosť prvotných porúch. Medzi nevýhody je možné zaradiť zložitosť zmeny zaťaženia, keďže je nutné rozobrať a prestaviť celý vahadlový systém. Univerzálne vahadlové systémy sú veľmi zložité a je častokrát menej náročné vyrobiť jednoúčelový vahadlový systém. [8]

S ohľadom na uvedené skutočnosti je na statickú skúšku pre konkrétne krídlo vybraný spôsob zaťažovania vahadlovým systémom.

7.1 Skúšané prípady

Na preukázanie dostatočnej pevnosti predpis CS 23.305 stanovuje nutnosť skúšať krídlo na prevádzkové zaťaženie bez trvalých škodlivých deformácií. Maximálne možné prípady reprezentujú v tomto prípade maximálny ohyb a maximálny krut.

Maximálny ohyb krídla

Maximálny ohyb krídla je v prípade kladného poryvu pri cestovnej rýchlosti a hmotnostnej konfigurácii m_{MaxNLP} , ktorý reprezentuje bod C v letovej obálke. Charakteristické hodnoty pre tento prípad sú uvedené v tabuľke číslo 38.

Tab. 38 Charakteristiky prípadu pre maximálny ohyb

| | | |
|--------------------|-------------------|--------|
| Rýchlosť letu | v_c [m/s] | 97,22 |
| | v_c [km/h] | 350 |
| Násobok | n [-] | 4,35 |
| Súčiniteľ vztlaku | Cl [-] | 0,81 |
| Hmotnosť lietadla | m [-] | 1358,6 |
| Výchylka krídeliek | δ_{kr} [°] | 0 |
| Výchylka klapiek | δ_{kl} [°] | 0 |

Maximálny ohyb krídla

Maximálny krut je v prípade záporného poryvu pri rýchlosti v_D a hmotnostnej konfigurácii m_{MaxTOW} , reprezentujúci bod E' letovej obálky. Charakteristické hodnoty pre tento prípad sú uvedené v tabuľke číslo 39.

Tab. 39 Charakteristiky prípadu pre maximálny ohyb

| | | |
|--------------------|-------------------|--------|
| Rýchlosť letu | v_D [m/s] | 119,44 |
| | v_D [km/h] | 430 |
| Násobok | n [-] | -0,80 |
| Súčiniteľ vztlaku | Cl [-] | -0,11 |
| Hmotnosť lietadla | m [-] | 1550 |
| Výchylka krídeliek | δ_{kr} [°] | 0,00 |
| Výchylka klapiek | δ_{kl} [°] | 0 |

Podľa predpisu CS23.965 je nutné v prípade integrálnej nádrže uskutočniť skúšku ohybu krídla s plnou nádržou.

Maximálny ohyb krídla s plnou nádržou

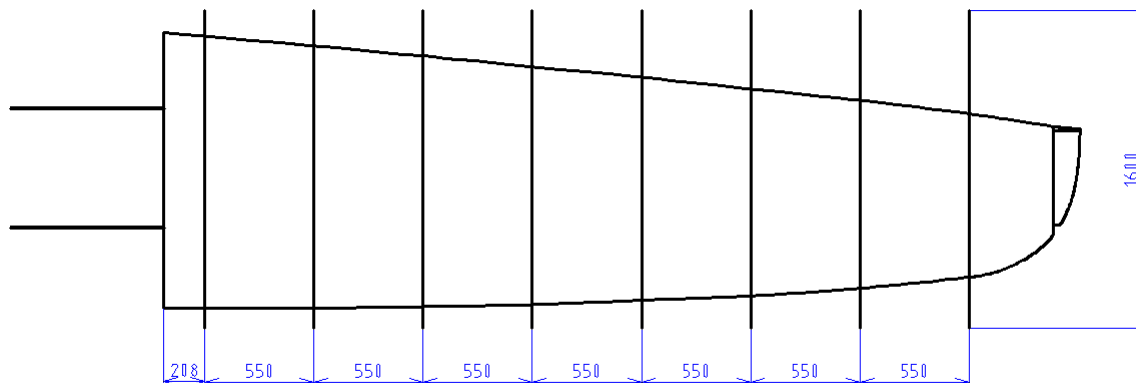
Maximálny ohyb krídla s plnou nádržou je v prípade kladného poryvu pri cestovnej rýchlosti a hmotnostnej konfigurácii m_{MaxTOW} , ktorý reprezentuje bod C v letovej obálke pre danú hmotnostnú kategóriu. Charakteristické hodnoty pre tento prípad sú uvedené v tabuľke číslo 40.

Tab. 40 Charakteristiky prípadu pre maximálny ohyb

| | | |
|--------------------|-------------------|-------|
| Rýchlosť letu | v_c [m/s] | 97,22 |
| | v_c [km/h] | 350 |
| Násobok | n [-] | 3,94 |
| Súčiniteľ vztlaku | Cl [-] | 0,54 |
| Hmotnosť lietadla | m [-] | 1550 |
| Výchylka krídeliek | δ_{kr} [°] | 0 |
| Výchylka klapiek | δ_{kl} [°] | 0 |

7.2 Klieštiny

Celkový počet klieštín je navrhnutý v počte 8 pre všetky skúšané prípady. Je to dostatočný počet na presné nasimulovanie ohybového momentu. Pozícia každej klieštiny je uvedená v na obrázku č. 17.



Obr. 17 Pozície klieštín

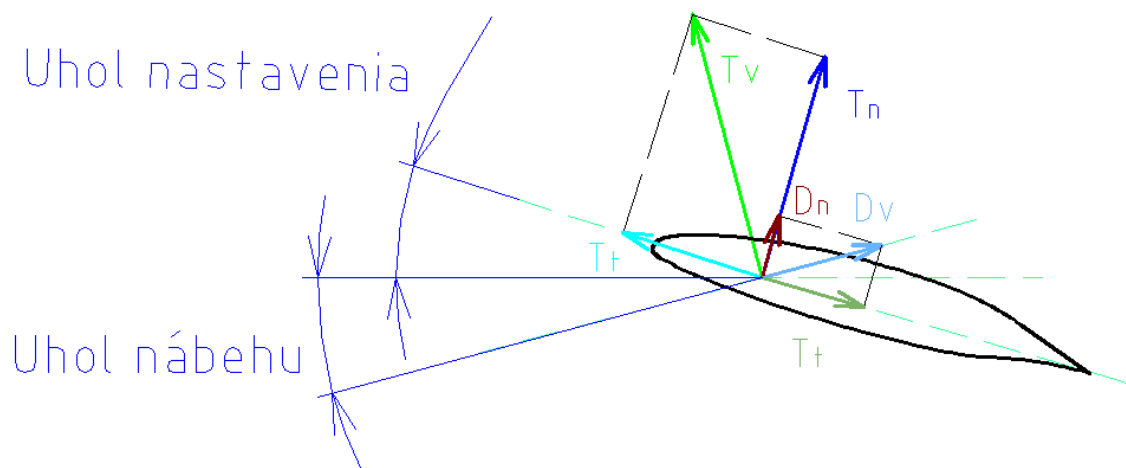
Klieštiny sú navrhnuté z preglejky o hrúbke 25 mm. Každá z klieštín je vystužená po obvode z oboch strán konštrukciou z U profilov aby bolo zaručené, že klieštiny bez poruchy a s dostatočnou tuhosťou prenesú zaťaženie na krídlo. Prehľad parametrov klieštín je uvedený v tabuľke č.41.

Tab. 41 Parametre klieštín

| Poloha | Rozmery klieštín | | Preglejka | U rám | Celková klieština |
|--------|------------------|-----------|---------------|---------------|-------------------|
| [m] | šírka [m] | výška [m] | hmotnosť [kg] | hmotnosť [kg] | hmotnosť [kg] |
| 4,85 | 1,6 | 0,35 | 9,9 | 41,366 | 51,266 |
| 4,3 | 1,6 | 0,35 | 9,48 | 41,366 | 50,846 |
| 3,75 | 1,6 | 0,35 | 9,12 | 41,366 | 50,486 |
| 3,2 | 1,6 | 0,35 | 8,78 | 41,366 | 50,146 |
| 2,65 | 1,6 | 0,35 | 8,44 | 41,366 | 49,806 |
| 2,1 | 1,6 | 0,35 | 8,14 | 41,366 | 49,506 |
| 1,55 | 1,6 | 0,35 | 7,8 | 41,366 | 49,166 |
| 1 | 1,6 | 0,35 | 7,18 | 41,366 | 48,546 |

7.3 Určenie normálových a tečných zložiek síl

Pre správne navrhnutie statickej skúšky krídla pomocou vahadlového systému je nutné rozdeliť vypočítané zaťaženie v kapitole 4 do normálových a tečných zložiek k tetive profilu vid' obrázok číslo 18. Veľkosti síl a uhlov sú iba názorného charakteru a nereprezentujú skutočné veľkosti. Odporové zložky do tečného a normálového smeru sú v nasledujúcich výpočtoch zanedbané, keďže nie je známe rozloženie odporu po rozpätí. Zanedbanie je možné, pretože výsledná sila odporu je v porovnaní s výslednou vzdušnou silou veľmi malá.



Obr. 18 Normálové a tečné zložky síl

$$\begin{aligned} T_t &= T_v \sin(\alpha + \varphi_{kor}) + D_v \cos(\alpha + \varphi_{kor}) \\ T_n &= D_v \sin(\alpha + \varphi_{kor}) + T_v \cos(\alpha + \varphi_{kor}) \end{aligned}$$

Kde α je uhol nábehu a je získaná z poláry lietadla na základe znalosti veľkosti Cl pre konkrétny režim letu.

Tečný ohybový moment a normálový ohybový moment je získaný integráciou posúvajúcich tečných a normálových síl po polrozpätí. Výpočet integrácie bol rovnako ako v prípade výpočtov zaťaženia uskutočnený v programe Excel a bola využitá lichobežníková numerická integrácia.

$$\begin{aligned} Mo_t(y) &= \int_0^{\frac{b}{2}} T_t(y) dy \\ Mo_n(y) &= \int_0^{\frac{b}{2}} T_n(y) dy \end{aligned}$$

7.4 Uchytenie krídla v skúšobni

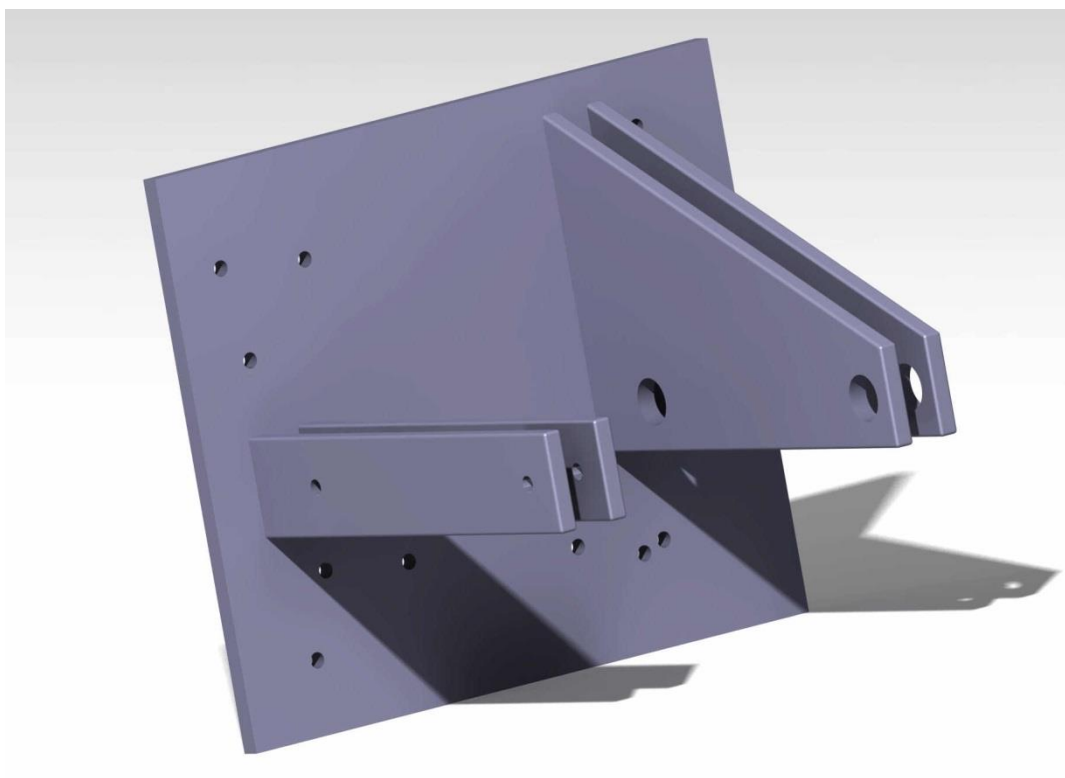
Zaťažovať sa bude v skúšobni pomocou mostového žeriavu, ktorý dokáže zaťažovať priamo len vertikálne. Zaťažovanie krídla uchyteného v horizontálnej rovine by teda bolo pod uhlom značne komplikované. Rovnako skúšanie pomocou dvoch vahadlových systémov v tomto prípade nie je vhodné pre značnú zložitosť. Najjednoduchšou možnosťou a plne postačujúcou v tomto prípade je natočenie samotného skúšaného vzorku o určitý uhol tak, aby výsledná sila nahradila ako tečné tak aj normálové zložky posúvajúcich síl. V tomto prípade pri zanedbaní odporových síl po rozpätí odpovedá tento uhol súčtu uhlov nastavenia (3°) a nábehu. Uhol nábehu je odčítaný z poláry lietadla. Celkový uhol nastavenia krídla pre skúšku:

- maximálneho ohybu je $7,565^\circ$,
- maximálneho krutu je $-3,11^\circ$
- maximálneho ohybu s plnou nádržou je $7,807^\circ$.

V prípade maximálneho krutu je nutné dodať, že sily na neho pôsobiace sú záporného smeru a preto sa celé krídlo otočí o 180° v smere y osy. Teda uhol nastavenia pre skúšku bude teoreticky $176,89^\circ$.

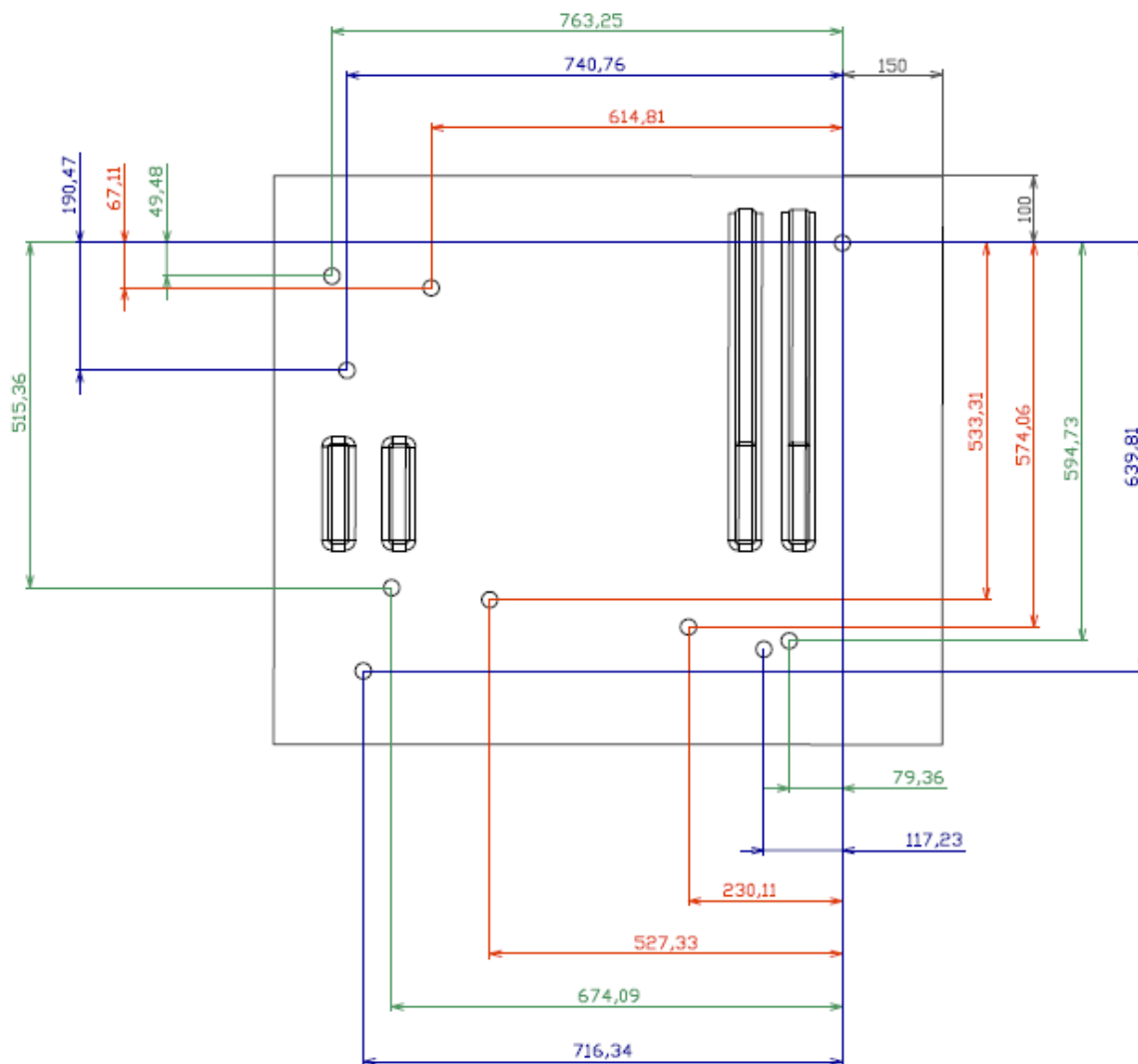
7.4.1 Prípravok na uchytenie krídla

Uchytenie krídla je navrhnuté realizovať pomocou prípravku, ktorý sa pripevní pomocou šraub k pevnej základni v skúšobni. Tento prípravok bude použiteľný pri všetkých troch statických skúškach tohto krídla, teda zabezpečí natočenie krídla do požadovaných uhlov. Prípravok je zvarok piatich kusov oceľových platní, vid' obrázok číslo 18. Medzi dvojice zvislých platní sa uchytia krakorce krídla pomocou čapov.



Obr. 19 Vizualizácia prípravku

Na centrálnej časti je v pravom hornom rohu umiestnená diera, ktorá slúži pre uchytenie prípravku pre všetky tri realizované skúšky. Správne natočenie krídla pre konkrétnu skúšku zabezpečí príslušná sada dier. Na obrázku číslo 20 sú zakótované a farebne odlišené sady dier. Zelená sada slúži na nastavenia uhla natočenia krídla pre skúšku maximálneho ohybu. Modrá sada pre skúšku maximálneho ohybu s plnou nádržou. Červená sada slúži na nastavenie krídla pri skúške maximálneho krutu krídla.



Obr. 20 Pozície a označenie dier na prípravku

7.4.1.1 Únosnosť prípravku

Prípravok je nutné dimenzovať tak, aby bezpečne dokázal preniesť zaťaženie, ktoré je na neho pri skúške vyvinuté. Sily prechádzajúce z krakorca do ramien prípravku vyvolávajú ohybové a šmykové napätie týchto častí. Materiál komponentov je oceľ 11353 s $R_m = 216$ MPa.

Ohybové napätie obdĺžnikovných častí je najväčšie v mieste votknutia k centrálnej časti.

$$\sigma_{obd} = \frac{M_{o\ obd}}{W_{o\ obd}}$$

Šmykové napätie je dané výrazom:

$$\tau_{obd} = \frac{(F_{ZP} + F_{ZL})}{S_{obd}}$$

Redukované napätie:

$$\sigma_{RED obl} = \sqrt{\sigma_{obd} + 4\tau_{obd}}$$

Únosnosť:

$$\eta_{obl} = \frac{R_m}{\sigma_{RED obl}}$$

Tab. 42 Únosnosť obdĺžnikovej časti prípravku

| | | Maximálny ohyb | Maximálny krut |
|--|--------------------------|----------------|----------------|
| Ohybové napätie obdĺžnikových častí | σ_{obd} [MPa] | 112,58 | 32,84 |
| Šmykové napätie obdĺžnikových častí | τ_{obd} [MPa] | 0,94 | -0,17 |
| Redukované napätie obdĺžnikových častí | $\sigma_{RED obd}$ [MPa] | 112,59 | 32,84 |
| Únosnosť obdĺžnikových častí | η_{obl} [-] | 1,95 | 6,70 |

Ohybové napätie lichobežníkových častí nebude v mieste votknutia. Výpočtom bolo zistené, že maximálne ohybové napätie bude 300 mm od votknutia.

Ohybové napätie:

$$\sigma_{lich max} = \frac{M_{o lich(300)}}{W_{o lich (300)}}$$

Šmykové napätie je dané výrazom:

$$\tau_{obd} = \frac{(F_{PP})}{S_{lich(300)}}$$

Redukované napätie:

$$\sigma_{RED lich} = \sqrt{\sigma_{lich} + 4\tau_{lich}}$$

Únosnosť:

$$\eta_{lich} = \frac{R_m}{\sigma_{RED lich}}$$

Tab. 43 Únosnosť lichobežníkovej časti prípravku

| | | Maximálny ohyb | Maximálny krut |
|--|---------------------------|----------------|----------------|
| Ohybové napätie obdĺžnikových častí | σ_{lich} [MPa] | 169,19 | 51,80 |
| Šmykové napätie obdĺžnikových častí | τ_{lich} [MPa] | 3,79 | 8,06 |
| Redukované napätie obdĺžnikových častí | $\sigma_{RED lich}$ [MPa] | 135,77 | 52,43 |
| Únosnosť obdĺžnikových častí | η_{lich} [-] | 1,62 | 4,20 |

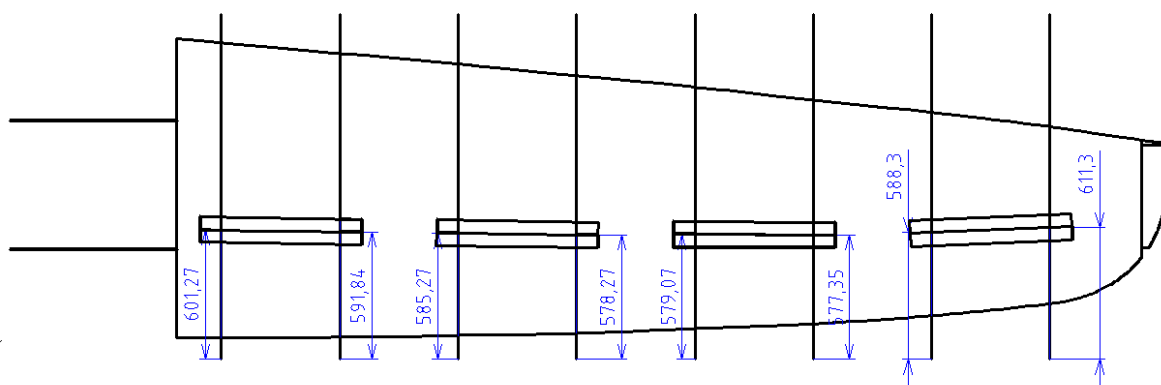
Únosnosť zvarových spojov je uvedená v prílohe číslo 5.

7.5 Skúška maximálneho ohybu krídla

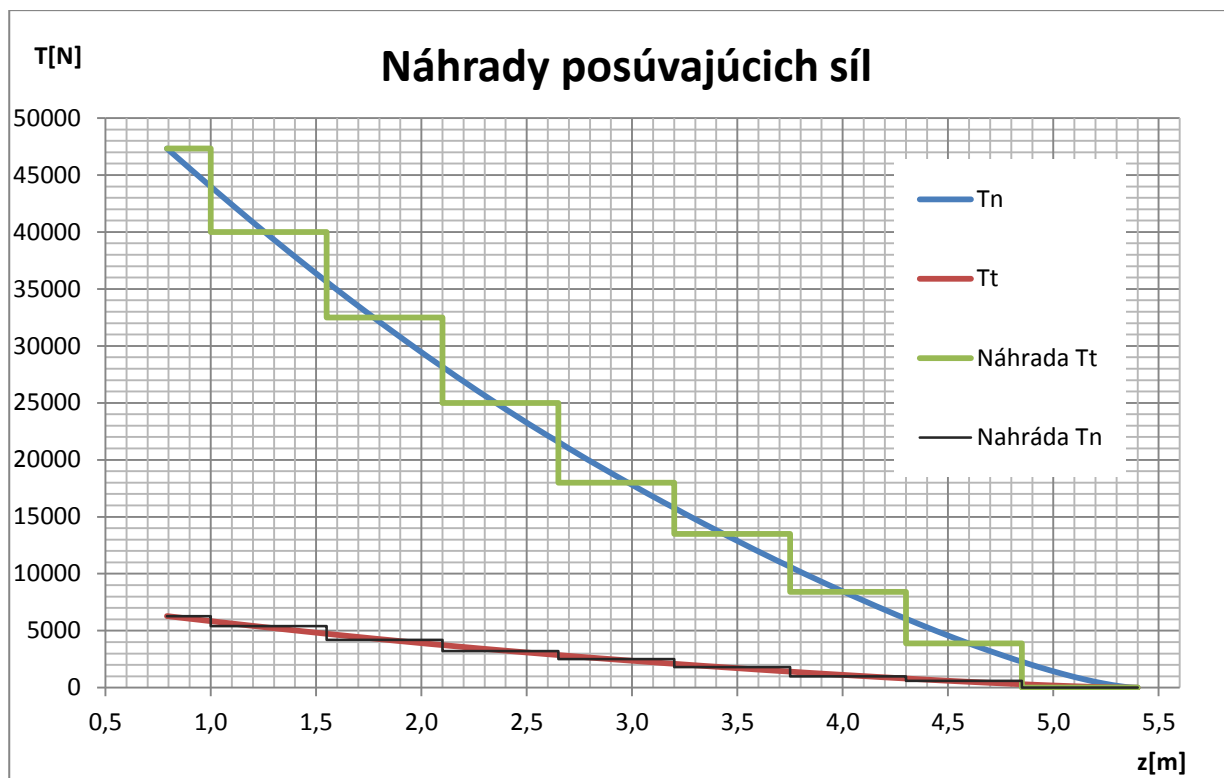
Ako bolo spomenuté, najväčší ohyb krídla je v bode C obálky pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxNLP} . Posúvajúce sily sú nahradené skokovo (vid' obr. 21) v miestach klieštín. Veľkosti síl sú volené tak, aby približne zodpovedali veľkosti síl zaťaženia a hlavne, aby tieto sily čo najvernejšie napodobňovali ohybový moment krídla v tečnom aj normálovom smere, obr. č. 22. Krútiaci moment je dosiahnutý správnou voľbou pozície zavedených síl po dĺžke klieštiny. Konkrétne výpočty síl a pozícií sú uvedené v Prílohe číslo 6. Pre prehľadnosť sú v tabuľke číslo 47 uvedené iba výsledné sily a pozície zavedených síl. Výsledné sily sú brané ako vektorový súčet tečných a normálových náhrad v každom smere. Na obrázku č. 24. sú graficky znázornené pozície uchytenia klieštín prvého stupňa vahadlového systému. Kvôli prehľadnosti sú dva najvyššie stupne systému v nákrese vynechané.

Tab. 44 Celkové náhrady síl pri maximálnom ohybe krídla

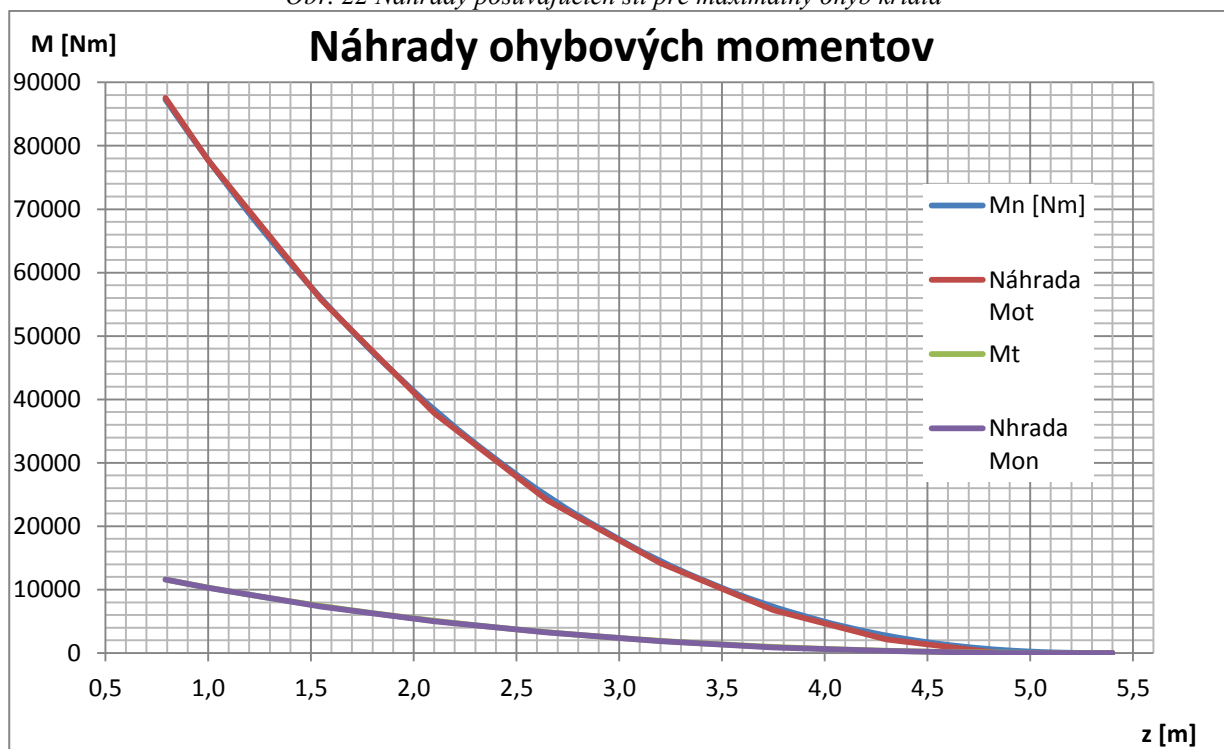
| Pozícia klieštiny v y | Pozícia na klieštine v smere x | Celková náhrada |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------|
| [m] | [mm] | [N] |
| 4,85 | 611,30 | 3945,9 |
| 4,30 | 588,30 | 4517,7 |
| 3,75 | 577,35 | 5162,4 |
| 3,20 | 579,07 | 4554,1 |
| 2,65 | 578,27 | 7034,9 |
| 2,10 | 585,27 | 7566,4 |
| 1,55 | 591,84 | 7595,4 |
| 1,00 | 601,27 | 7381,5 |



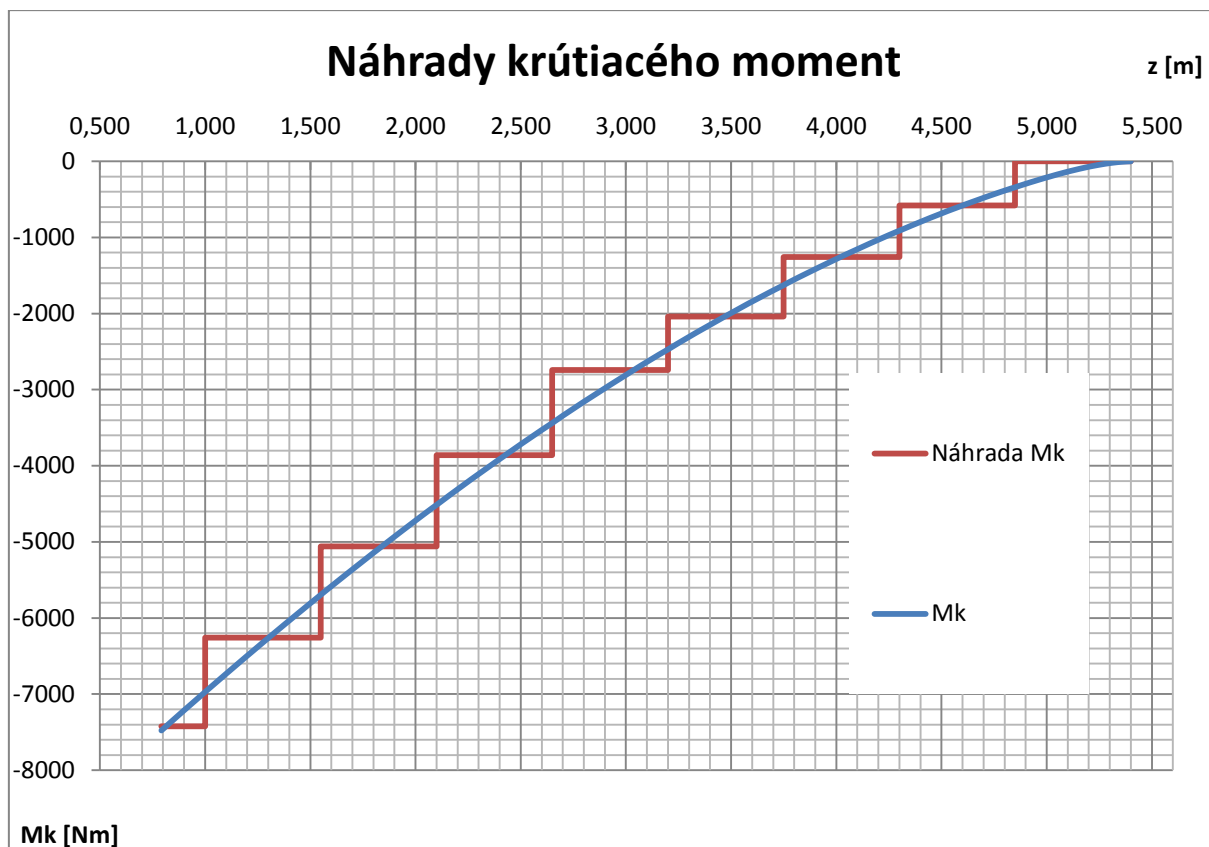
Obr. 21 Grafické znázornenie prvého stupňa klieštín



Obr. 22 Náhrady posúvajúcich síl pre maximálny ohyb krídla



Obr. 23 Náhrady ohybových momentov pre maximálny ohyb krídla



Obr. 24 Náhrady krútiaceho momentu pre maximálny ohyb krídla

7.5.1 Vahadlový systém pre skúšku maximálneho ohybu

Vahadlový systém pre skúšku maximálneho ohybu krídla pozostáva zo siedmich vahadiel, ako vidieť na obrázku č. 25. Sily v prvom stupni vahadlového systému sú určené v predchádzajúcej kapitole a číselne vyjadrené v tabuľke 44. Pre výpočet ramien každého vahadla (označené V_i) je použitá silová a momentová rovnováha.

$$\sum T_{ij} = 0$$

$$\sum M_{ij} = 0$$

Kde:

i vyjadruje označenie vahadla a nadobúda hodnoty 1 až 8

j vyjadruje označenie pozície na vahadle – P – napravo

L – naľavo

S – v strede

Platí:

$$T_{iS} = T_{iP} + T_{iL}$$

$$T_{5P} = |T_{1S}|$$

$$T_{5L} = |T_{2S}|$$

$$T_{6P} = |T_{3S}|$$

$$T_{6L} = |T_{4S}|$$

$$T_{7P} = |T_{5S}|$$

$$T_{7L} = |T_{6S}|$$

Výpočet ramien:

$$r_{ij} = \frac{T_{iL}}{T_{iS}} \cdot r_i$$

Kde: Onačenie dolných indexov ramien odpovedá označovaniu dolných indexov síl

Platí:

$$r_i = r_{iP} + r_{iL}$$

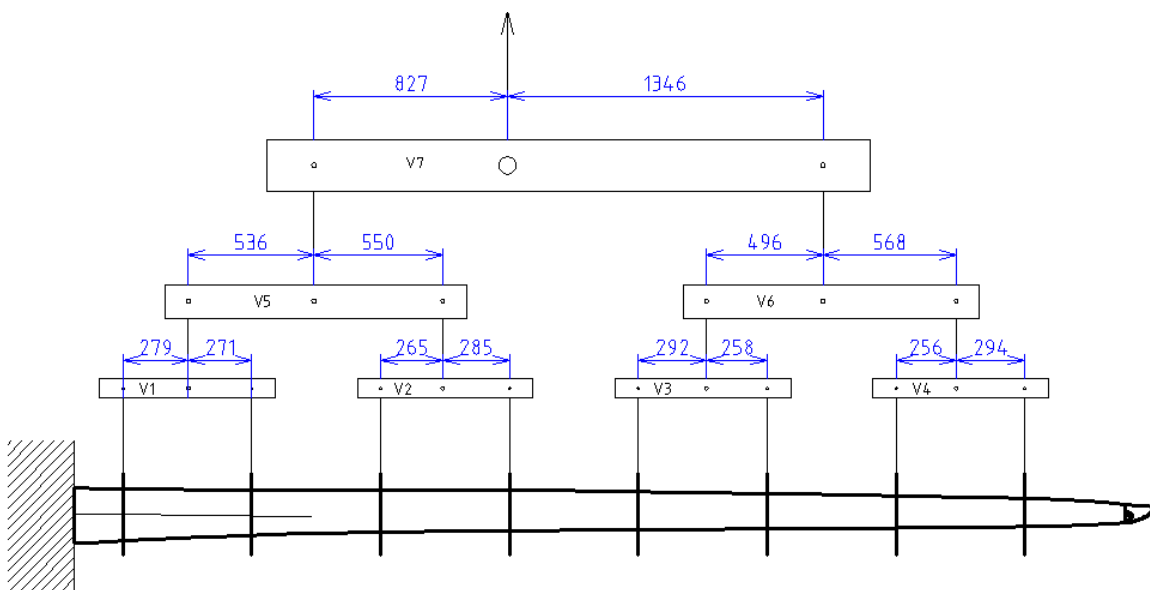
$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = 550\text{mm} - \text{odpovedá rozteču klieštin}$$

$$r_5 = 3r_1 - r_{1L} - r_{2P}$$

$$r_5 = 3r_1 - r_{3L} - r_{4P}$$

$$r_7 = 7r_1 - r_{1L} - r_{5L} - r_{4P} - r_{6P}$$

Výpočet dĺžky ramien vahadiel bol uskutočnený pomocou uvedených vzorcov v programe Excel. Výsledné hodnoty sú uvedené v tabuľke 45 a graficky na obrázku číslo 25.



Obr. 25 Vahadlový systém pre maximálny ohyb krídla

Tab. 45 Dĺžky ramien

| Vahadlo | Index pozícia na vahadle | Sily T | Ramená |
|---------|--------------------------|--------|--------|
| i | j | [N] | [m] |
| 1 | L | 7382 | 0,279 |
| | P | 7595 | 0,271 |
| | S/- | 14977 | 0,550 |
| 2 | L | 7566 | 0,265 |
| | P | 7035 | 0,285 |
| | S/- | 14601 | 0,550 |
| 3 | L | 4554 | 0,292 |
| | P | 5162 | 0,258 |
| | S/- | 9716 | 0,550 |
| 4 | L | 4518 | 0,256 |
| | P | 3946 | 0,294 |
| | S/- | 8464 | 0,550 |
| 5 | L | 14977 | 0,536 |
| | P | 14601 | 0,550 |
| | S/- | 29578 | 1,086 |
| 6 | L | 9716 | 0,495 |
| | P | 8464 | 0,569 |
| | S/- | 18180 | 1,064 |
| 7 | L | 29578 | 0,827 |
| | P | 18180 | 1,346 |
| | S/- | 47758 | 2,173 |

Každé vahadlo pozostáva z dvojice U profilov. Rozmery prierezu profilov a súčinitele bezpečnosti sú uvedené v tabuľke č. 46. Materiál komponentov je oceľ 11353 s $R_m = 216$ MPa. Rozmery U profilov a moduly prierezov sú určené zo strojnícych tabuliek. [7] Súčiniteľ bezpečnosti je nadimenzovaný na minimálnu hodnotu 4, ktorý zabezpečí dostatočnú pevnosť a tuhosť celého systému. [8]

Vzťahy pre výpočet momentov a napätí:

$$M_{oi} = r_{iP} T_{iP}$$

$$\sigma_{\max U i} = \frac{M_{o U i}}{W_{o U i}}$$

$$\eta_{ohyb \max i} = \frac{R_m}{\sigma_{\max U i}}$$

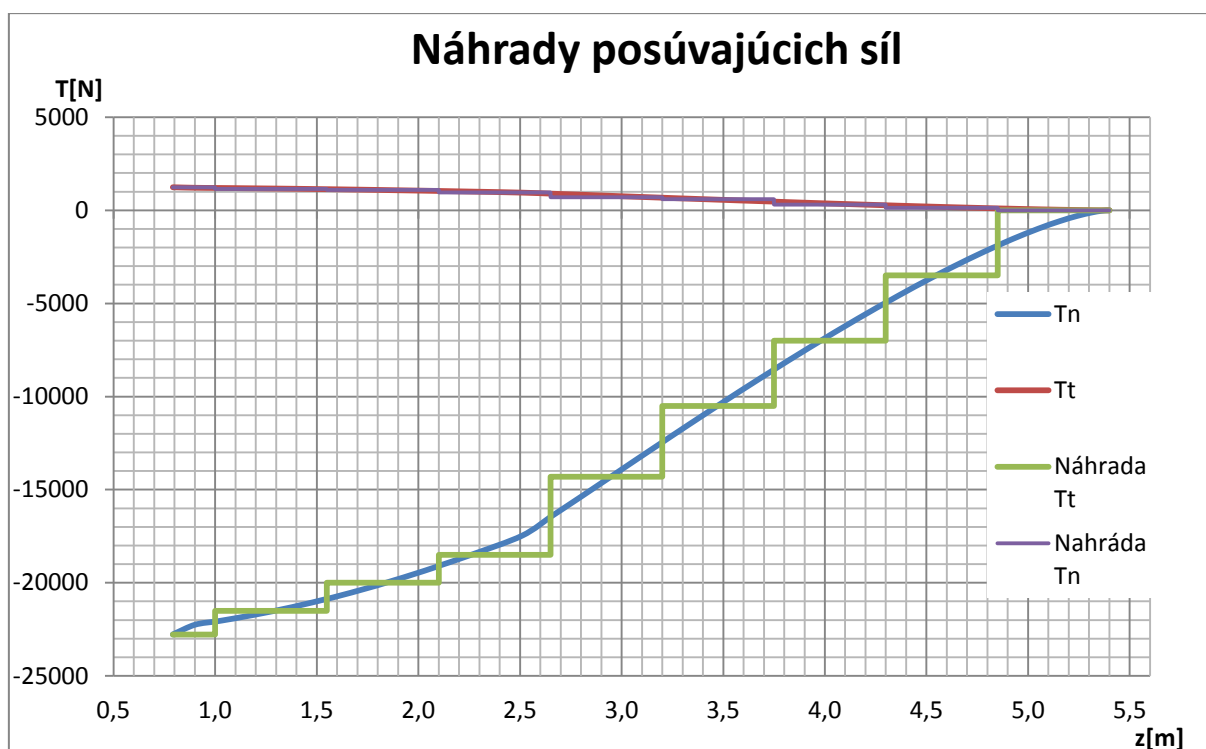
Tab. 46 Rozmery a bezpečnosti vahadlového systému

| | | | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 |
|--------------------------------|-------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Výška nosníku | H | [mm] | 80 | 80 | 80 | 80 | 140 | 140 | 220 |
| Šírka nosníku | B | [mm] | 45 | 45 | 45 | 45 | 60 | 60 | 80 |
| Hrúbka steny U profilu | t_U | [mm] | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 9 |
| Maximálny ohybový moment U | M_{o_U} | [Nm] | 2058909 | 2005017 | 1330781 | 1158435 | 8029665 | 4813867 | 24462251 |
| Moduly prierezu nosníku | W_{o_U} | [mm ³] | 52988 | 52988 | 52988 | 52988 | 172792 | 172792 | 489977 |
| Napätie v mieste M_{o_U} MAX | $\sigma_{\max U}$ | [Mpa] | 38,86 | 37,84 | 25,11 | 21,86 | 46,47 | 27,86 | 49,93 |
| Súčiniteľ bezpečnosti v ohybe | n_U | [-] | 5,6 | 5,7 | 8,6 | 9,9 | 4,6 | 7,8 | 4,3 |

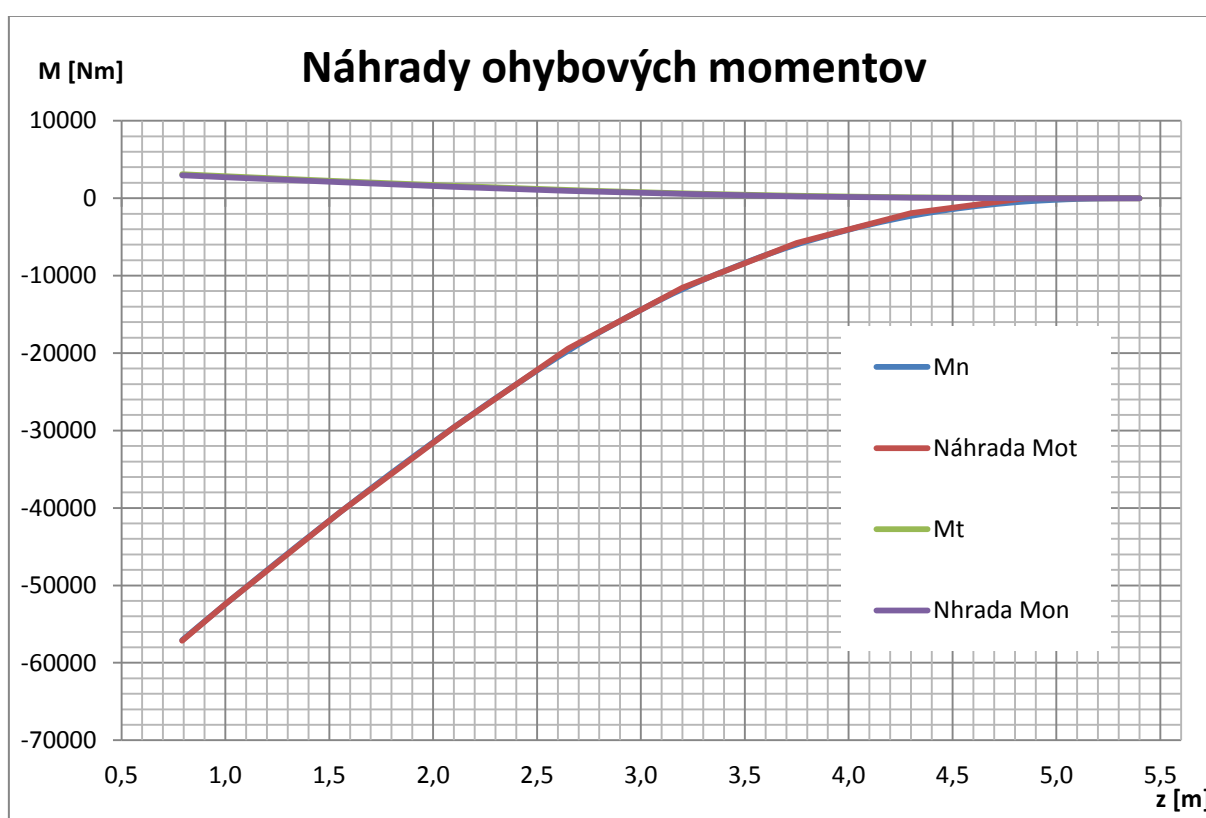
7.6 Skúška maximálneho krutu krídla

Najväčší krut krídla je v bode E' obálky pre maximálnu vzletovú hmotnosť. Pri skúšaní krídla v krute sa využíva v praxi bežne to, že sa priebeh krútiaceho momentu uvažuje z bodu E' obálky a priebeh posúvajúcich síl z bodu F obálky. Je možné navrhnúť skúšku čisto pre bod E', ale výsledné ramená na dosiahnutie správneho priebehu krutu po rozpätí by boli príliš veľké a nepraktické.

Veľkosti síl sú volené tak, aby približne odpovedali veľkosti síl zaťaženia, a hlavne aby tieto sily čo najvernejšie napodobňovali ohybový moment krídla v tečnom aj normálovom smere (obr. č. 27).



Obr. 26 Náhrady posúvajúcich síl pre maximálny krut krídla



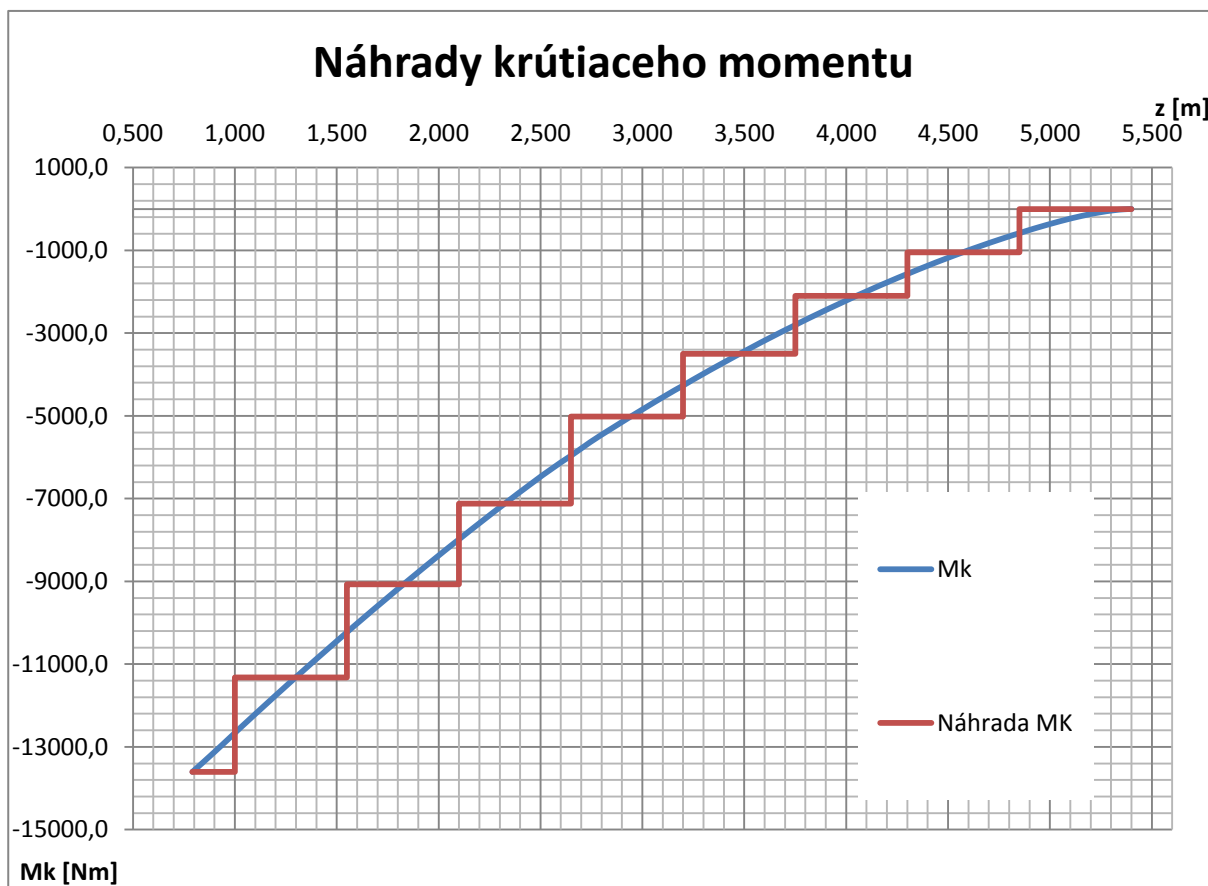
Obr. 27 Náhrady ohybových momentov pre maximálny krut krídla

Krútiaci moment je dosiahnutý správnou voľbou pozície zavedených síl po dĺžke klieštiny. Konkrétne výpočty síl a pozícií sú uvedené v Prílohe číslo 6. Pre prehľadnosť sú

v tabuľke číslo 47 uvedené iba výsledné sily a pozície zavedených síl. Výsledné sily (celkové náhrady) sú brané ako vektorový súčet tečných a normálových náhrad v každom smere.

Tab. 47 Celkové náhrady síl pri maximálnom krute krídla

| Pozícia klieštiny v y | Pozícia na klieštine v smere x | Celková náhrada |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------|
| [m] | [mm] | [N] |
| 4,85 | 162,41 | 3502,2 |
| 4,30 | 137,89 | 3504,4 |
| 3,75 | 21,64 | 3512,8 |
| 3,20 | 22,67 | 3801,3 |
| 2,65 | -81,07 | 4207,4 |
| 2,10 | -874,00 | 1507,5 |
| 1,55 | -1067,75 | 1500,8 |
| 1,00 | -1354,15 | 1274,0 |



Obr. 28 Náhrady krútiaceho momentu pre maximálny krut krídla

7.6.1 Vahadlový systém pre skúšku maximálneho krutu

Vahadlový systém pre skúšku maximálneho ohybu krídla pozostáva zo siedmich vahadiel, rovnako ako pri skúške maximálneho ohybu. Sily v prvom stupni vahadlového systému sú určené v predchádzajúcej kapitole a číselne vyjadrené v tabuľke 47. Pre výpočet ramien každého vahadla (označené V_i) je použitá silová a momentová rovnováha.

$$\sum T_{ij} = 0$$

$$\sum M_{ij} = 0$$

Kde:

i vyjadruje označenie vahadla a nadobúda hodnoty 1 až 8

j vyjadruje označenie pozície na vahadle – P – napravo

L – naľavo

S – v strede

Platí:

$$T_{iS} = T_{iP} + T_{iL}$$

$$T_{5P} = |T_{1S}|$$

$$T_{5L} = |T_{2S}|$$

$$T_{6P} = |T_{3S}|$$

$$T_{6L} = |T_{4S}|$$

$$T_{7P} = |T_{5S}|$$

$$T_{7L} = |T_{6S}|$$

Výpočet ramien:

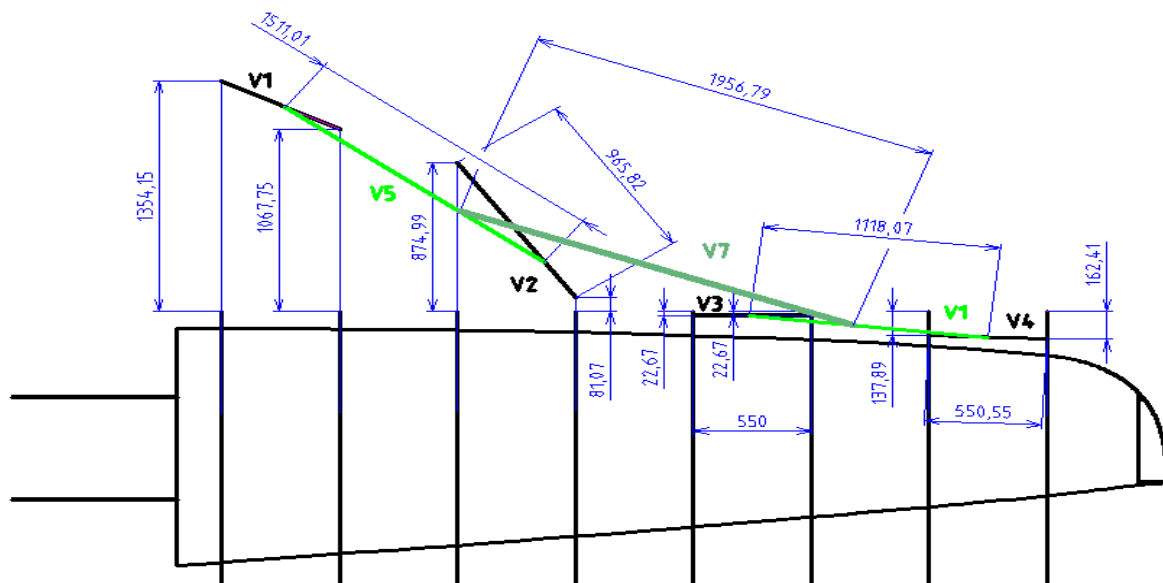
$$r_{ij} = \frac{T_{iL}}{T_{iS}} \cdot r_i$$

Kde: Onačenie dolných indexov ramien odpovedá označovaniu dolných indexov síl

Platí:

$$r_i = r_{iP} + r_{iL}$$

Keďže vahadlový systém pre skúšku maximálneho krutu neleží v jednej rovine a ani v rovinách kolmých ku rovinám klieštín, je nutné určiť dĺžku jednotlivých vahadiel (r_i) samostatne. V tejto práci boli určené celkové dĺžky vahadiel graficky v programe Autocad. Výpočet dĺžok konkrétnych ramien vahadiel bol uskutočnený pomocou uvedených vzorcov v programe Excel. Výsledné hodnoty sú uvedené v tabuľke 48 a graficky na obrázku číslo 29.



Obr. 29 Vahadlový systém pre maximálny krut krídla

Tab. 48 Dĺžky ramien

| Vahadlo | Index pozícia na vahadle | Sily T | Ramená |
|---------|--------------------------------|--------|--------|
| i | j | [N] | [m] |
| 1 | L | 1274 | 0,335 |
| | P | 1501 | 0,285 |
| | S/- | 2775 | 0,620 |
| 2 | L | 1507 | 0,710 |
| | P | 4207 | 0,255 |
| | S/- | 5715 | 0,965 |
| 3 | L | 3801 | 0,264 |
| | P | 3513 | 0,286 |
| | S/- | 7314 | 0,550 |
| 4 | L | 3504 | 0,275 |
| | P | 3502 | 0,275 |
| | S/- | 7007 | 0,551 |
| 5 | L | 2775 | 1,017 |
| | P | 5715 | 0,494 |
| | S/- | 8490 | 1,511 |
| 6 | L | 7314 | 0,489 |
| | P | 7007 | 0,511 |
| | S/- | 14321 | 1,000 |
| 7 | L | 8490 | 1,228 |
| | P | 14321 | 0,728 |
| | S/- | 22811 | 1,957 |

Každé vahadlo pozostáva z dvojice U profilov. Rozmery prierezu profilov a súčinitele bezpečnosti sú uvedené v tabuľke č. 49. Materiál komponentov je s ocele 11353 s Rm 216 MPa. Rozmery U profilov a moduly prierezu sú určené zo strojníckych tabuliek. [7] Súčiniteľ bezpečnosti je nadimenzovaný na minimálnu hodnotu 4, ktorý zabezpečí dostatočnú pevnosť a tuhosť celého systému. [8]

Vzťahy pre výpočet momentov a napätí:

$$M_{oi} = r_{iP} T_{iP}$$

$$\sigma_{\max U i} = \frac{M_{o U i}}{W_{o U i}}$$

$$\eta_{ohyb \max i} = \frac{R_m}{\sigma_{\max U i}}$$

Tab. 49 Rozmery a bezpečnosti vahadlového systému

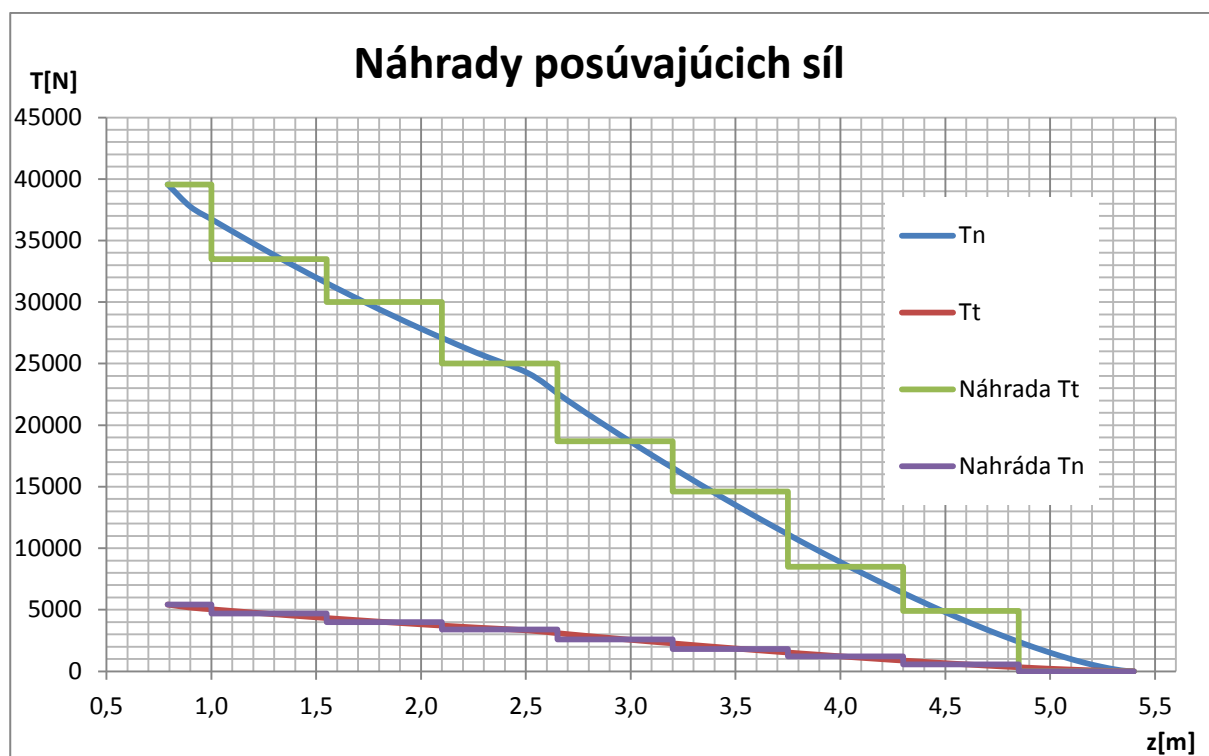
| | | | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 |
|-------------------------------|-------------------|--------------------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|----------|
| Výška nosníka | H | [mm] | 80 | 80 | 80 | 80 | 140 | 140 | 220 |
| Šírka nosníka | B | [mm] | 45 | 45 | 45 | 45 | 60 | 60 | 80 |
| Hrúbka steny U profilu | t _U | [mm] | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 9 |
| Maximálny ohybový moment U | M _{o U} | [Nmm] | 427303 | 1071001 | 1004133 | 964364 | 2822435 | 3578537 | 10429693 |
| Moduly prierezu nosníka | W _{o U} | [mm ³] | 52988 | 52988 | 52988 | 52988 | 172792 | 172792 | 489977 |
| Napätie v mieste Mo U MAX | $\sigma_{\max U}$ | [Mpa] | 8,06 | 20,21 | 18,95 | 18,20 | 16,33 | 20,71 | 21,29 |
| Súčiniteľ bezpečnosti v ohybe | n _U | [-] | 26,8 | 10,7 | 11,4 | 11,9 | 13,2 | 10,4 | 10,1 |

7.7 Skúška maximálneho ohybu krídla s plnou nádržou

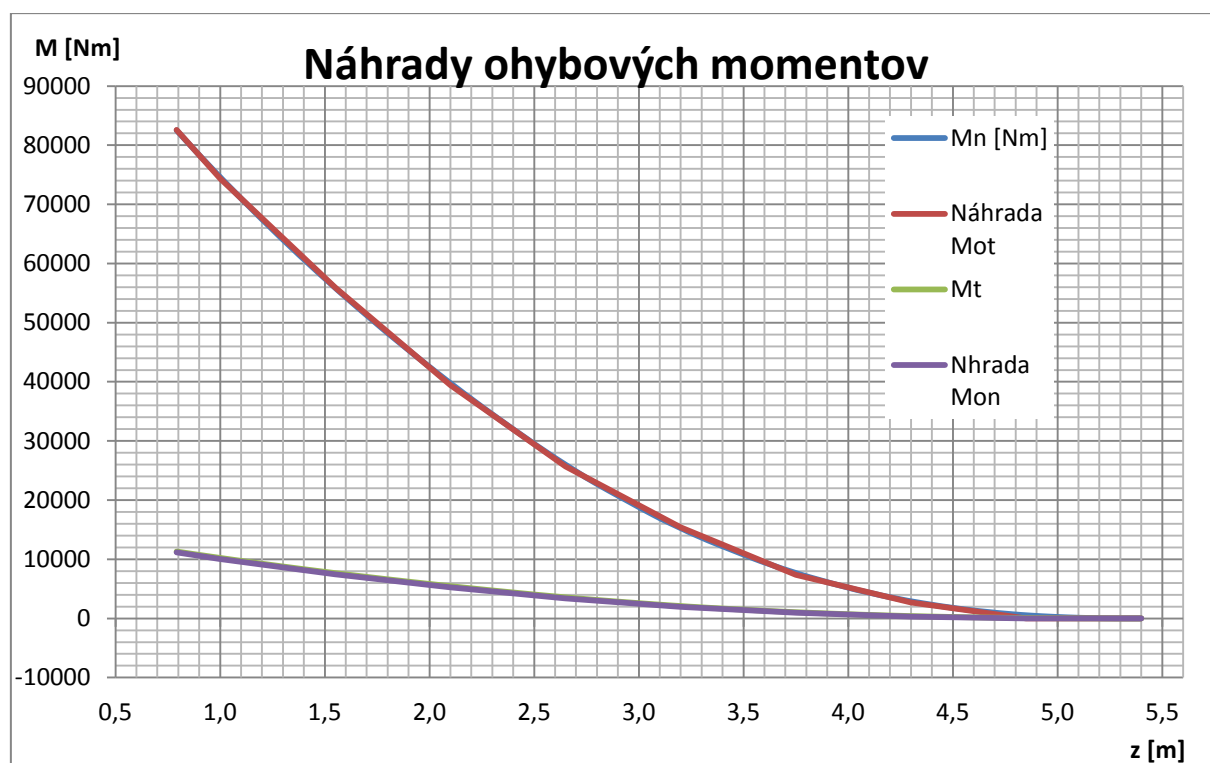
Ako bolo spomenuté, najväčší ohyb krídla s plnou nádržou je v bode C obálky pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxTOW}. Posúvajúce sily sú nahradené skokovo (vid' obr. 30) v miestach klieštín. Veľkosti síl sú volené tak, aby približne odpovedali veľkosti síl zaťaženia a hlavne aby tieto sily čo najvernejšie napodobňovali ohybový moment krídla v tečnom aj normálovom smere (obr. č 31). Krútiaci moment je dosiahnutý správnou voľbou pozície zavedených síl po dĺžke klieštiny. Konkrétne výpočty síl a pozícií sú uvedené v Prílohe číslo 6. Pre prehľadnosť sú v tabuľke číslo 50 uvedené iba výsledné sily a pozície zavedených síl. Výsledné sily sú brané ako vektorový súčet tečných a normálových náhrad v každom smere. Na obrázku č. 33 sú graficky znázornené pozície uchytenia klieštín prvého a druhého stupňa vahadlového systému. Kvôli prehľadnosti je najvyšší stupeň systému v nákrese vynechaný.

Tab. 50 Celkové náhrady síl pri maximálnom ohybe krídla s plnou nádržou

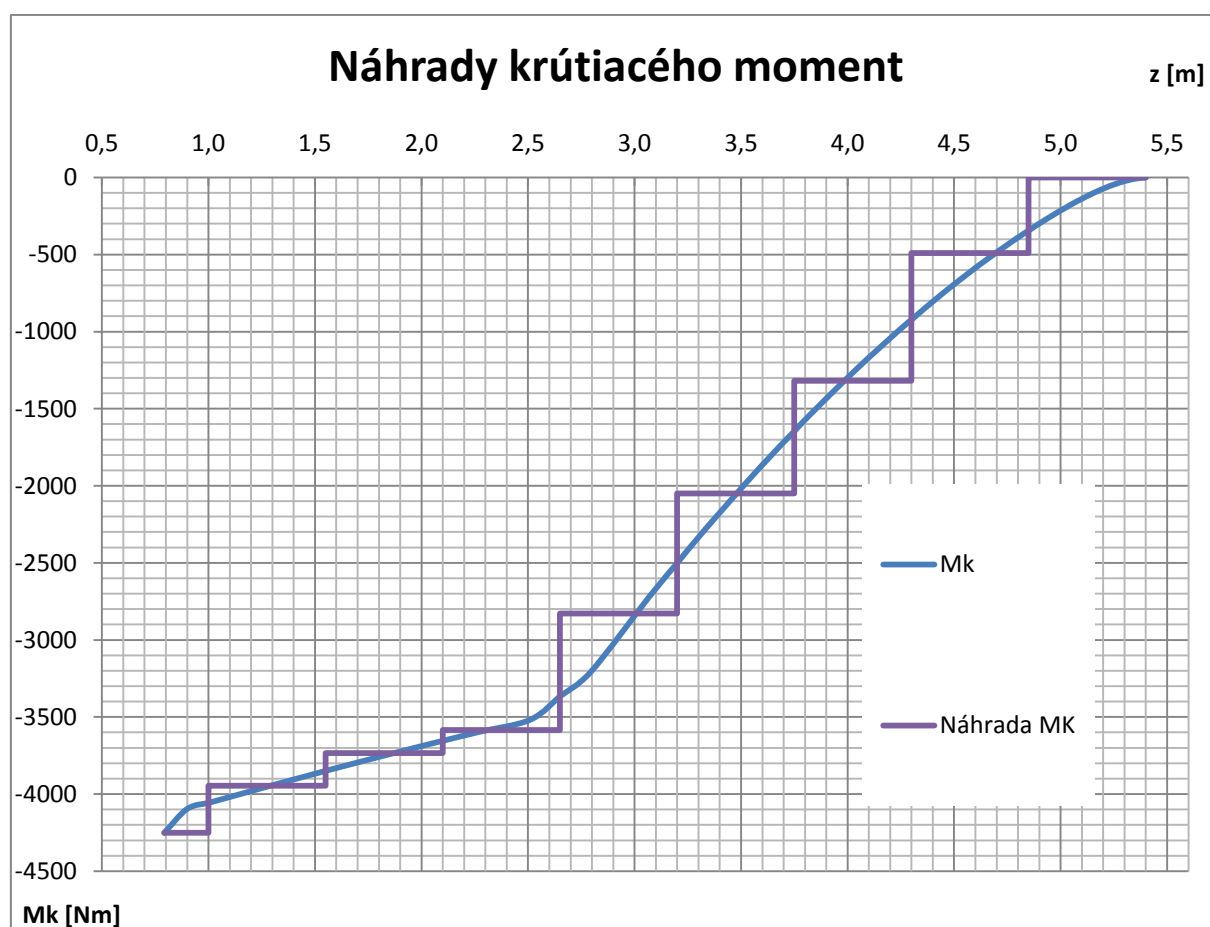
| Pozícia kľestiny v y | Pozícia na kľestine v smere x | Celková náhrada |
|-------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| [m] | [mm] | [N] |
| 4,85 | 562,41 | 4930,8 |
| 4,30 | 667,89 | 3658,2 |
| 3,75 | 544,11 | 6129,4 |
| 3,20 | 612,67 | 4177,3 |
| 2,65 | 538,93 | 6350,6 |
| 2,10 | 455,01 | 5035,9 |
| 1,55 | 492,25 | 3569,3 |
| 1,00 | 493,27 | 6103,4 |



Obr. 30 Náhrady posúvajúcich síl pre maximálny ohyb krídla s plnou nádržou



Obr. 31 Náhrady ohybových momentov pre maximálny ohyb krídla s plnou nádržou



Obr. 32 Náhrady krútiaceho momentu pre maximálny ohyb krídla s plnou nádržou

7.7.1 Vahadloový systém pre skúšku maximálneho ohybu

Vahadloový systém pre skúšku maximálneho ohybu krídla pozostáva zo siedmich vahadiel, ako vidieť na obrázku č. 33. Sily v prvom stupni vahadlového systému sú určené v predchádzajúcej kapitole a číselne vyjadrené v tabuľke 50. Pre výpočet ramien každého vahadla (označené V_i) je použitá silová a momentová rovnováha.

$$\sum T_{ij} = 0$$

$$\sum M_{ij} = 0$$

Kde:

i vyjadruje označenie vahadla a nadobúda hodnoty 1 až 8
 j vyjadruje označenie pozície na vahadle – P – napravo
 L – naľavo
 S – v strede

Platí:

$$T_{iS} = T_{iP} + T_{iL}$$

$$T_{5P} = |T_{1S}|$$

$$T_{5L} = |T_{2S}|$$

$$T_{6P} = |T_{3S}|$$

$$T_{6L} = |T_{4S}|$$

$$T_{7P} = |T_{5S}|$$

$$T_{7L} = |T_{6S}|$$

Výpočet ramien:

$$r_{ij} = \frac{T_{iL}}{T_{iS}} \cdot r_i$$

Kde: Onačenie dolných indexov ramien odpovedá označovaniu dolných indexov síl

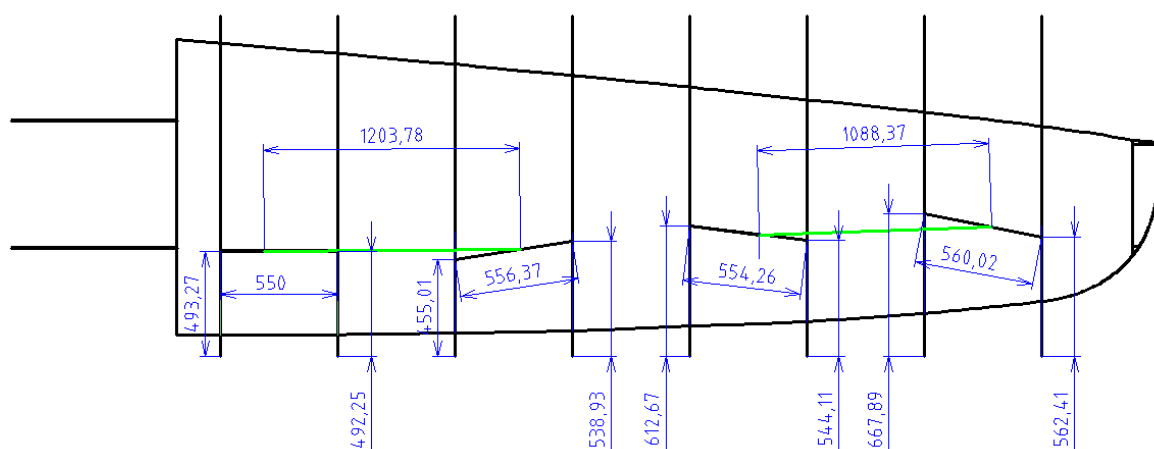
Platí:

$$r_i = r_{iP} + r_{iL}$$

Vahadloový systém pre skúšku maximálneho krutu neleží v jednej rovine a ani v rovinách kolmých ku rovinám klieštín, je nutné určiť dĺžku jednotlivých vahadiel (r_i) samostatne. V tejto práci boli určené celkové dĺžky vahadiel graficky v programe Autocad, obr.33. Výpočet dĺžok konkrétnych ramien vahadiel bol uskutočnený pomocou uvedených vzorcov v programe. Výsledné hodnoty sú uvedené v tabuľke 51 a graficky na obrázku číslo 33.

Tab. 51 Dĺžky ramien

| Vahadlo | Index pozícia na vahadle | Sily T | Ramená |
|---------|--------------------------------|--------|--------|
| i | j | [N] | [m] |
| 1 | L | 6103 | 0,203 |
| | P | 3569 | 0,347 |
| | S/- | 9673 | 0,550 |
| 2 | L | 5036 | 0,310 |
| | P | 6351 | 0,246 |
| | S/- | 11386 | 0,556 |
| 3 | L | 4177 | 0,330 |
| | P | 6129 | 0,225 |
| | S/- | 10307 | 0,554 |
| 4 | L | 3658 | 0,321 |
| | P | 4931 | 0,239 |
| | S/- | 8589 | 0,560 |
| 5 | L | 9673 | 0,651 |
| | P | 11386 | 0,553 |
| | S/- | 21059 | 1,204 |
| 6 | L | 10307 | 0,495 |
| | P | 8589 | 0,594 |
| | S/- | 18896 | 1,088 |
| 7 | L | 21059 | 1,026 |
| | P | 18896 | 1,144 |
| | S/- | 39955 | 2,170 |



Obr. 33 Vahadlový systém pre maximálny ohyb krídla s plnou nádržou

Každé vahadlo pozostáva z dvojice U profilov. Rozmery prierezu profilov a súčinitele bezpečnosti sú uvedené v tabuľke č. 52. Materiál komponentov je oceľ 11353 s $R_m = 216$ MPa. Rozmery U profilov a moduly prierezov sú určené zo strojníckych tabuliek. [7] Súčiniteľ bezpečnosti je nadimenzovaný na minimálnu hodnotu 4, ktorý zabezpečí dostatočnú pevnosť a tuhosť celého systému. [8]

Vzťahy pre výpočet momentov a napätí:

$$M_{oi} = r_{iP} T_{iP}$$

$$\sigma_{\max U i} = \frac{M_{o U i}}{W_{o U i}}$$

$$\eta_{ohyb \max i} = \frac{R_m}{\sigma_{\max U i}}$$

Tab. 52 Rozmery a bezpečnosti vahadlového systému

| | | | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 |
|--------------------------------|-------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Výška nosníka | H | [mm] | 80 | 80 | 80 | 80 | 140 | 140 | 220 |
| Šírka nosníka | B | [mm] | 45 | 45 | 45 | 45 | 60 | 60 | 80 |
| Hrúbka steny U profilu | t_u | [mm] | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 9 |
| Maximálny ohybový moment U | $M_{o u}$ | [Nmm] | 1238716 | 1562644 | 1376915 | 1176110 | 6295685 | 5098899 | 21612988 |
| Moduly prierezu nosníka | $W_{o u}$ | [mm ³] | 52988 | 52988 | 52988 | 52988 | 172792 | 172792 | 489977 |
| Napätie v mieste $M_{o U MAX}$ | $\sigma_{\max u}$ | [Mpa] | 23,38 | 29,49 | 25,99 | 22,20 | 36,44 | 29,51 | 44,11 |
| Súčiniteľ bezpečnosti v ohybe | n_u | [-] | 9,2 | 7,3 | 8,3 | 9,7 | 5,9 | 7,3 | 4,9 |

7.8 Postup skúšok

Uskutočnenie skúšok je navrhnuté v tomto poradí:

1. Skúška maximálneho krutu krídla

Prípravok na uchytenie krídla sa s krídlom prichytí pomocou šraub v skúšobni k tuhému stojanu, pričom sa využije červená sada dier, ktoré zaručia správne natočenie krídla.

Vyvažovanie vahadlového systému pre maximálny krut je navrhnuté realizovať pomocou protizávaží. Po zavesení celého vahadlového systému na žeriav sa vždy začína vyvažovať od spodných stupňov systému až po vrchné. Po vyvážení sa silomer medzi vahadlovým systémom a zaťažovadlom vynuluje.

Po ukončení prípravy sa začína so samotnou realizáciu skúšky. Postupným zdvíhaním celého vahadlového systému sa krídlo zaťažuje dovtedy, pokiaľ neukazuje silomer hodnotu, ktorá odpovedá prevádzkovému zaťaženiu krídla pre tento skúšaný prípad. Pri tejto hodnote predpis CS23.305 definuje, že musí konštrukcia ostať bez trvalých škodlivých deformácií a deformácia nesmie narušiť bezpečnú prevádzku. Po overení tejto požiadavky sa zaťaženie postupne zvyšuje na početné zaťaženie. Na preukázanie únosnosti krídla predpis CS 23.305 definuje, že musí konštrukcia vydržať toto zaťaženie po dobu najmenej troch sekúnd. Následne sa krídlo odľahčí a skontroluje sa, či sa vyskytli nejaké poškodenia krídla.

2. Skúška maximálneho ohybu krídla s plnou nádržou

Príprava skúšky pre maximálny ohyb s plnou nádržou bude rovnaká ako pre maximálny krut, s tým rozdielom, že sa využije modrá sada dier na prípravku a nádrž v krídle sa naplní maximálny množstvom paliva (150 litrov).

Po ukončení prípravy sa začína so samotnou realizáciu skúšky. Postupným zdvíhaním celého vahadlového systému sa krídlo zaťažuje dovtedy, pokiaľ neukazuje silomer hodnotu, ktorá odpovedá prevádzkovému zaťaženiu krídla pre tento skúšaný prípad. Následne sa krídlo odľahčí a uskutoční sa kontrola tesnosti nádrže.

3. Skúška maximálneho ohybu krídla

Po skúške krídla s plnou nádržou je navrhnuté skúšať krídlo pre maximálny ohyb. Tento prípad nastane v bode C letovej obálky pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxNLP} . Krídlo bude pri tejto skúške bez paliva v nádržiach a je teda nutné vypustiť palivo, ktoré bolo napustené v predchádzajúcej skúške. Po vypustení paliva bude príprava skúšky rovnaká, ako pre maximálny krut, s tým rozdielom, že sa využije zelená sada dier na prípravku, ktoré zaručia správne natočenie krídla.

Po ukončení prípravy sa začína so samotnou realizáciu skúšky. Postupným zdvíhaním celého vahadlového systému sa krídlo zaťažuje dovtedy, pokiaľ neukazuje silomer hodnotu, ktorá odpovedá prevádzkovému zaťaženiu krídla pre tento skúšaný prípad. Pri tejto hodnote predpis CS23.305 definuje, že musí konštrukcia ostať bez trvalých škodlivých deformácií a deformácia nesmie narušiť bezpečnú prevádzku. Po overení tejto požiadavky sa zaťaženie postupne zvyšuje na početné zaťaženie. Na preukázanie únosnosti krídla predpis CS 23.305 definuje, že musí konštrukcia vydržať toto zaťaženie po dobu najmenej troch sekúnd. Následne sa krídlo zaťažuje až do poruchy, čím sa overí či nie je konštrukcia predimenzovaná.

8 Záver

V práci boli po stručnom oboznámení sa s lietadlom vypracované letové obálky na základe predpisu CS 23. Výpočet bol uskutočnený pre tri hmotnostné kategórie a to pre maximálnu vzletovú hmotnosť, minimálnu vzletovú hmotnosť a maximálnu vzletovú hmotnosť nevztlakových častí. Následným výpočtom zaťaženia aerodynamickými a zotrvačnými silami pre všetky body všetkých obálok, boli určené prípady, ktoré zaťažujú krídlo v maximálnej miere. Prípady maximálneho ohybového momentu na krídlo nastávajú pri cestovnej rýchlosti a kladnom poryve, ktorý reprezentuje bod C v letovej obálke pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxNLP} . Maximálny krútiaci moment na krídle vzniká pri strmhlavom lete so záporným poryvom pôsobiacim na lietadlo a maximálnou vzletovou hmotnosťou. Tento prípad reprezentuje bod E' v letovej obálke pre príslušnú hmotnostnú kategóriu.

Konštrukcia je navrhnutá ako celokompozitová. Pásnice nosníkov sú navrhnuté z uhlíkového rovingu. Stojny nosníkov, poťah a koreňové rebro je navrhnuté ako kompozitný sendvič. Jadro tohto sendviču je pena Divinycell. Počet vrstiev v konkrétnych rezoch krídla je určený na základe dosiahnutia čo najpriateľnejších súčiniteľov rezervy.

Účelom pevnostnej analýzy je overenie správnosti voľby množstva použitého materiálu. Správnosť voľby je možné vyjadriť číselne pomocou súčiniteľa rezervy, ktorý musí byť vyšší alebo rovný číslu jedna, ale zároveň dostatočne nízky, aby nedošlo k predimenzovaniu konštrukcie a tým pádom aj nežiaducemu zvyšovaniu hmotnosti. V práci sú všetky vypočítané súčinitele vyššie ako 1 a znížené do najnižšej možnej miery.

V diplomovej práci je spracovaná aj statická pevnostná skúška krídla. Predpis definuje nutnosť testovať krídlo na tri možné prípady. Pre prípad maximálneho ohybu krídla, prípad maximálneho krutu krídla a pre prípad maximálneho ohybu krídla. Pre všetky tri prípady je v práci vypracovaná metodika skúšky do uceleného programu skúšky.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] MERTL, Vlastimil. *Konstrukce a projektování letadel*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR Real, 2000, 133 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojího inženýrství). ISBN 80-214-1789-7.
- [2] EASA Certification specification. Www.easa.eu [online]. 2011 [cit. 9. Dubna 2011]. Dostupný z WWW: http://easa.europa.eu/ws_prod/g/doc/Agency_Mesures/Certification_Spec/CS-E%20A2/CS-E_Amendment%202.pdf
- [3] PETRÁSEK, Miloslav. *Konstrukce letadel I*. Vyd. 1. Brno: Vojenská akademie v Brně, 2004. 149s.
- [4] PÁVEK, Jozef. KOPŘIVA, Zdeněk. *Konstrukce a projektování letadel*. Vyd. 1. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1982, 203 s.
- [5] ČTVERÁK, J, MERTL, V, Píštěk, A, .: *Soubor podkladů pro pevnostní výpočty leteckých konstrukcí*, Letecký ústav VUT-FSI, Brno, 1997
- [6] KOUTNÍK, Tomáš. *Aerostatické podklady letounu TL 4000*, Brno University of Technology, 2014
- [7] LEINVEBER, Jan. *Strojnické tabulky*. 2. uprav. a dopl.vyd. Praha: Scientia, 1999, 911 s. ISBN 80-718-3164-6.
- [8] DREXLER, Jan. et al. *Pevnost a zkoušky leteckých konstrukcí*. 1. vyd. Brno: VAAZ, 1965. 151 s.
- [9] JURAČKA, Jaroslav. *Kompozitní konstrukce v letectví*, Zpráva LÚ01-2007-OST.ST, rev 4, VUT v Brně
- [10] KOUTNÍK, Tomáš. *Koncepční aerodynamický návrh letounu TL-4000*, Brno University of Technology, 2013

Zoznam príloh

Príloha číslo 1: Hmotnostný rozbor
Príloha číslo 2: Výstup z programu Glauert III
Príloha číslo 3: Zaťaženie krídla
Príloha číslo 4: Ohybové momenty
Príloha číslo 5: Únosnosť zvarov
Príloha číslo 6: Výpočet ramien pre skúšky
Neviazaná príloh: Systémový výkres krídla

Zoznam označení, veličín, jednotiek a indexov

Označenia

| | |
|------------|---|
| CS 23 | stavebný predpis |
| Divinycell | značka peny použitej na jadrá sendvičov |
| M2 | profil krídla |
| MSA | medzinárodná štandardná atmosféra |
| NLF | Profil krídla |
| PL | predný ľavý čap/diera |
| PP | pravý predný čap/diera |
| TL | označenie lietadla |
| x,y,z | označenie osí |
| ZL | zadný ľavý čap/diera |

Veličiny a jednotky

| | | |
|-------------|---------------------|---|
| K_g | - | zmierňujúci poryvový súčiniteľ |
| x_T | - | poloha ťažiska |
| μ_g | - | hmotnostný pomer lietala |
| a | mm | vzdialenosť ohybovo elastickej osy od predného nosníka, |
| šírka | | |
| A | mm ² | plocha prierezu |
| B | mm | šírka profilu |
| b | mm, m | rozpätie, vzdialenosť medzi nosníkmi |
| C | mm, m | dĺžka tetivy |
| Cl | - | súčiniteľ vztlaku |
| Cl_α | 1/rad | sklon vztlakovej časti |
| d | mm | priemer |
| dl | mm, m | dĺžka |
| e | mm | vzdialenosť od okraja |
| E | MPa | Youngov modul pružnosti |
| F | N | sila |
| f | - | súčiniteľ bezpečnosti |
| g | m/s ² | gravitačné zrýchlenie |
| G | MPa | šmykový modul |
| H | m, km | nadmorská výška |
| h | mm, m | výška |
| h_e | mm | efektívna výška |
| J | mm ⁴ | kvadratický moment |
| K | lbs/ft ² | súčiniteľ daný predpisom |
| l | m, mm | vzdialenosť medzi |
| m | mm, m | hmotnosť |
| M | Nm, Nmm | moment |
| M_k | Nm, Nmm | krútiaci moment |
| M_o | Nm, Nmm | ohybový moment |
| n | - | množstvo, násobok |
| N | N | sila v pásnici |
| q | N/m, N/mm | líniové zaťaženie, šmykový tok |
| R_m | MPa | pevnosť |
| s | m, mm | obvod dutiny |

| | | |
|-----|-------------------------------------|---------------------------------|
| S | mm ² , m ² | plocha |
| t | mm | hrúbka |
| T | N | posúvajúca sila |
| U | mm ² , m ² | plocha dutiny |
| Ude | m/s | rýchlosť poryvu podľa CS pri vc |
| V | l, m ³ , mm ³ | objem |
| v | m/s, km/h, mm | rýchlosť, výška |
| W | ft ² | plocha |
| Wo | mm ³ | modul prierezu v ohybe |
| ε | ° | uhol geometrického krútenia |
| η | - | súčiniteľ rezervy |
| λ | - | štíhlosť |
| P | kg/m ³ | hustota |
| χ | ° | uhol šípu |
| ψ | ° | vzopätie |
| δ | ° | výchylka |
| σ | MPa | ohybové napätie |
| τ | MPa | šmykové napätie |
| φ | ° | uhol nastavenia krídla |

Indexy:

| | |
|------------|---|
| +/- | kladná/ záporná |
| 0 | koreňový |
| 1 | prvý, predný (napr. dutina, nosník, etc), kladný (násobok, etc.) |
| 2 | druhý, zadný (napr. dutina, nosník, etc), záporný (násobok, etc.) |
| A | obratová |
| anti | antisymetrický |
| AS | aerodynamická stred |
| C | cestovná |
| c, celk | celkový |
| č, čapov | čapov |
| D | dolná, strmhľavého letu |
| Dov | dovolené |
| EO | ohybovo elastická os |
| F | klapky |
| G | obratová na chrbte |
| H | horná |
| h | v stojne |
| hl | horizontálneho letu |
| CH | let na chrbte |
| k | koncový |
| Kab | kabína |
| klapka, kl | klapka |
| kr | krídelká |
| krak | krakorca |
| Krídla, kr | krídla |
| L | ľavý |
| Lep | lepeného spoja, lepidla |
| lich | lichobežníkových častí |

| | |
|---------|--|
| Max | maximálna , maximálny, maximálne |
| Min | minimálna , minimálny, minimálne |
| Mk | krútiaceh momentu |
| Mk | od krútiaceho momentu |
| mMaxNLP | konfigurácia s maximálnou hmotnosťou nevztlakových častí |
| mMaxTOW | konfigurácia s maximálnou vzletovou hmotnosťou |
| mMinTOW | konfigurácia s minimálnou vzletovou hmotnosťou |
| Mo | od ohybového mometntu |
| n | normálová |
| NLP | nevztlakových častí |
| obd | obdlžnikových častí |
| Otl | otlačenie |
| pas | pásnice |
| P | pravý |
| p | predný |
| Pal | palivo |
| Pal_kr | palivo v jednom krídle |
| poc | početný |
| poť | poťahu |
| PS | pásnica-stojna |
| Reb | rebra |
| RED | redukované |
| RP | rebro pásnica |
| S | pádová |
| s | stojny |
| SAT | stredná aerodynamická |
| SF | pádová s klapkami |
| sym | symetrický |
| šmyk | šmykový, v šmyku |
| T | od posúvajúcej sily |
| Taž | ťažisko |
| t | tečná |
| tah, d | ťah, tlak |
| TOW | vzletová |
| U | profil U |
| V | výsledný |
| v | vzdušná |
| vC | pre cestovnú rýchlosť |
| vD | pre rýchlosť strmhlavého letu |
| vrstvy | vrstvy |
| z | zadný |
| Z | zotrvačných |

Zoznam obrázkov

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Pôdorysný tvar krídla | 13 |
| Obr. 2 Geometria krídla | 13 |
| Obr. 3 Geometrické krútenie krídla | 14 |
| Obr. 4 Profiláž po polrozpätí krídla | 15 |
| Obr. 5 Obratová obálka pre všetky hmotnostné konfigurácie | 21 |
| Obr. 6 Klapková obálka pre všetky hmotnostné konfigurácie | 25 |
| Obr. 7 Celková letová obálka pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxTOW} | 27 |
| Obr. 8 Celková letová obálka pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MinTOW} | 29 |
| Obr. 9 Celková letová obálka pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxNLP} | 31 |
| Obr. 10 Vplyv vzopätia na krídlo | 38 |
| Obr. 11 Systémový výkres | 41 |
| Obr. 12 Označenie veličín | 43 |
| Obr. 13 Schéma predného nosníka a zadného nosníka | 45 |
| Obr. 14 Schéma lepených spojov | 54 |
| Obr. 15 Rozloženie síl na krakorcach a označenie dier na čapy | 56 |
| Obr. 16 Lepený spoj, rebro, poťah (RP) | 60 |
| Obr. 17 Pozície klieštín | 64 |
| Obr. 18 Normálové a tečné zložky síl | 65 |
| Obr. 19 Vizualizácia prípravku | 66 |
| Obr. 20 Pozície a označenie dier na prípravku | 67 |
| Obr. 21 Grafické znázornenie prvého stupňa klieštín | 69 |
| Obr. 22 Náhrady posúvajúcich síl pre maximálny ohyb krídla | 70 |
| Obr. 23 Náhrady ohybových momentov pre maximálny ohyb krídla | 70 |
| Obr. 24 Náhrady krútiaceho momentu pre maximálny ohyb krídla | 71 |
| Obr. 25 Vahadlový systém pre maximálny ohyb krídla | 72 |
| Obr. 26 Náhrady posúvajúcich síl pre maximálny krut krídla | 75 |
| Obr. 27 Náhrady ohybových momentov pre maximálny krut krídla | 75 |
| Obr. 28 Náhrady krútiaceho momentu pre maximálny krut krídla | 76 |
| Obr. 29 Vahadlový systém pre maximálny krut krídla | 78 |
| Obr. 30 Náhrady posúvajúcich síl pre maximálny ohyb krídla s plnou nádržou | 80 |
| Obr. 31 Náhrady ohybových momentov pre maximálny ohyb krídla s plnou nádržou | 81 |
| Obr. 32 Náhrady krútiaceho momentu pre maximálny ohyb krídla s plnou nádržou | 81 |
| Obr. 33 Vahadlový systém pre maximálny ohyb krídla s plnou nádržou | 83 |

Zoznam tabuliek

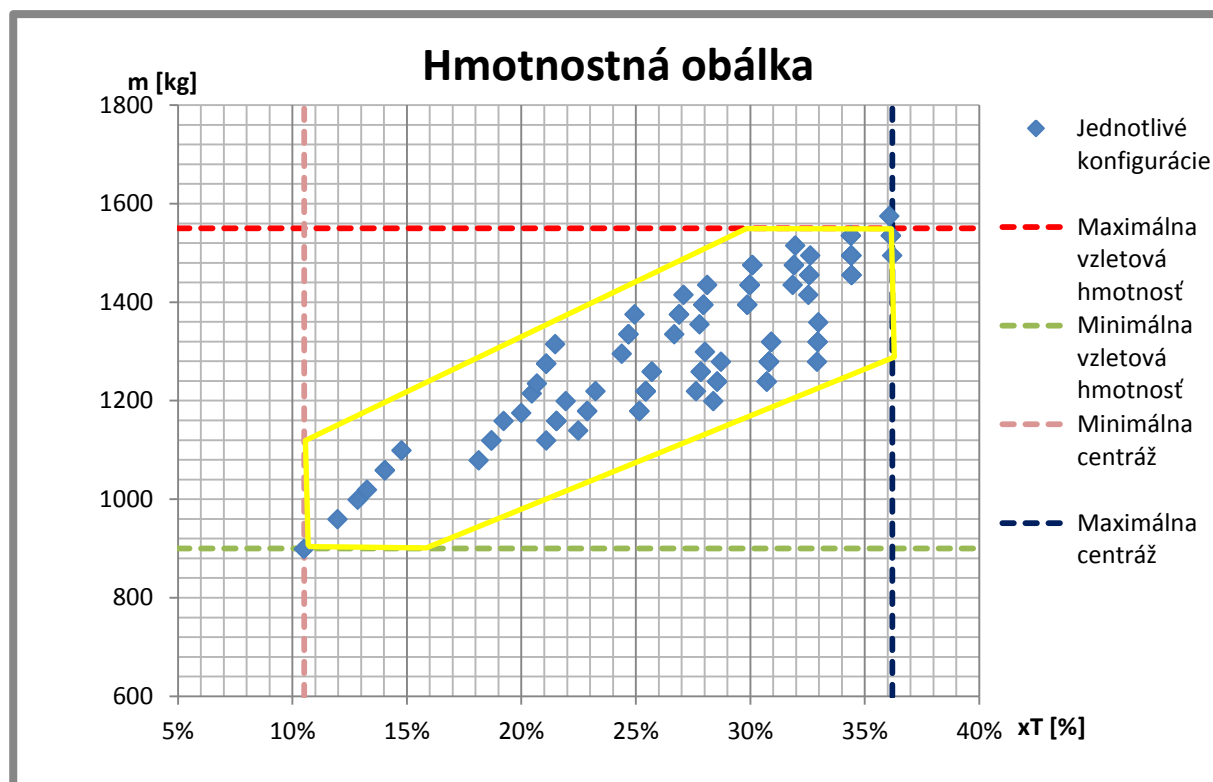
| | |
|--|----|
| Tab. 1 Základné parametre TL 4000..... | 12 |
| Tab. 2 Parametre krídla | 16 |
| Tab. 3 Vybrané hmotnosti..... | 17 |
| Tab. 4 Násobky zaťaženia pri manévroch | 19 |
| Tab. 5 Tabuľka vypočítaných hodnôt pre obrátové obálky | 22 |
| Tab. 6 Klapková obálka m_{MaxTOW} | 23 |
| Tab. 7 Klapková obálka pre m_{MinTOW} | 24 |
| Tab. 8 Klapková obálka pre m_{MaxNLP} | 25 |
| Tab. 9 Hodnoty pre poryvovú obálku hmotnostnej konfigurácie m_{MaxTOW} | 27 |
| Tab. 10 Hodnoty pre poryvovú obálku hmotnostnej konfigurácie m_{MinTOW} | 28 |
| Tab. 11 Hodnoty pre poryvovú obálku hmotnostnej konfigurácie m_{MaxNLP} | 30 |
| Tab. 12 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxTOW} | 32 |
| Tab. 13 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MinTOW} | 33 |
| Tab. 14 Prípady zaťaženia pre hmotnostnú konfiguráciu m_{MaxNLP} | 34 |
| Tab. 15 Priebeh početnej posúvajúcej sily , početného ohybového a krútiaceho momentu vo vybraných rezoch | 42 |
| Tab. 16 Priebeh početnej posúvajúcej sily , početného ohybového a krútiaceho momentu vo vybraných rezoch | 43 |
| Tab. 17 Geometria v rezoch | 44 |
| Tab. 18 Výšky a obsahy priereзов pásnic v jednotlivých rezoch | 45 |
| Tab. 19 Kvadratické momenty jednotlivých priereзов..... | 46 |
| Tab. 20 Súčinitele rezervy pásnic pri maximálnom ohybe krídla | 47 |
| Tab. 21 Súčinitele rezervy pásnic pri maximálnom krute krídla | 48 |
| Tab. 22 Šmykové toky v stojnách nosníkov od posúvajúcej sily pri maximálnom ohybe krídla | 49 |
| Tab. 23 Šmykové toky v stojnách nosníkov od posúvajúcej sily pri maximálnom krute krídla..... | 49 |
| Tab. 24 Šmykové toky v prvej a druhej dutine od krútiaceho momentu pre prípad maximálneho ohybu krídla ... | 50 |
| Tab. 25 Šmykové toky v prvej a druhej dutine od krútiaceho momentu pre prípad maximálneho krutu krídla..... | 51 |
| Tab. 26 Výsledné šmykové toky v stojnách pre prípad maximálneho ohybu krídla..... | 51 |
| Tab. 27 Výsledné šmykové toky v stojnách pre prípad maximálneho krutu krídla | 52 |
| Tab. 28 Počet vrstiev a súčiniteľ rezervy únosnosti stojny pre prípad maximálneho ohybu krídla..... | 53 |
| Tab. 29 Počet vrstiev a súčiniteľ rezervy únosnosti stojny pre prípad maximálneho krutu krídla | 53 |
| Tab. 30 Rozmery lepených spojov a príslušné súčinitele rezervy pre prípad max. ohybu..... | 55 |
| Tab. 31 Rozmery lepených spojov a príslušné súčinitele rezervy pre prípad max. krutu | 55 |
| Tab. 32 Voľba vrstiev a priemerov čapov a k nim vypočítané súčinitele rezervy pre jednotlivé čapy pre prípad maximálneho ohybu krídla..... | 57 |
| Tab. 33 Voľba vrstiev a priemerov čapov a k nim vypočítané súčinitele rezervy pre jednotlivé čapy pre prípad maximálneho ohybu krídla..... | 57 |
| Tab. 34 Počet vrstiev a súčiniteľ rezervy únosnosti potahu pre prípad maximálneho ohybu krídla..... | 58 |
| Tab. 35 Počet vrstiev a súčiniteľ rezervy únosnosti potahu pre prípad maximálneho ohybu krídla..... | 59 |
| Tab. 36 Súčinitele rezervy koreňového rebra | 59 |
| Tab. 37 Súčinitele rezervy lepených spojov koreňového rebra..... | 61 |
| Tab. 38 Charakteristiky prípadu pre maximálny ohyb | 63 |
| Tab. 39 Charakteristiky prípadu pre maximálny ohyb | 63 |
| Tab. 40 Charakteristiky prípadu pre maximálny ohyb | 63 |
| Tab. 41 Parametre klieštín | 64 |
| Tab. 42 Únosnosť obdĺžnikovej časti prípravku | 68 |
| Tab. 43 Únosnosť lichobežníkovej časti prípravku | 68 |
| Tab. 44 Celkové náhrady síl pri maximálnom ohybe krídla..... | 69 |
| Tab. 45 Dĺžky ramien | 73 |
| Tab. 46 Rozmery a bezpečnosti vahadlového systému | 74 |
| Tab. 47 Celkové náhrady síl pri maximálnom krute krídla | 76 |
| Tab. 48 Dĺžky ramien | 78 |
| Tab. 49 Rozmery a bezpečnosti vahadlového systému | 79 |
| Tab. 50 Celkové náhrady síl pri maximálnom ohybe krídla s plnou nádržou | 80 |
| Tab. 51 Dĺžky ramien | 83 |
| Tab. 52 Rozmery a bezpečnosti vahadlového systému | 84 |

Prílohy

Príloha číslo 1: Hmotnostný rozbor

Podklady pre riešenie hmotnostného rozboru dodané Leteckým ústavom

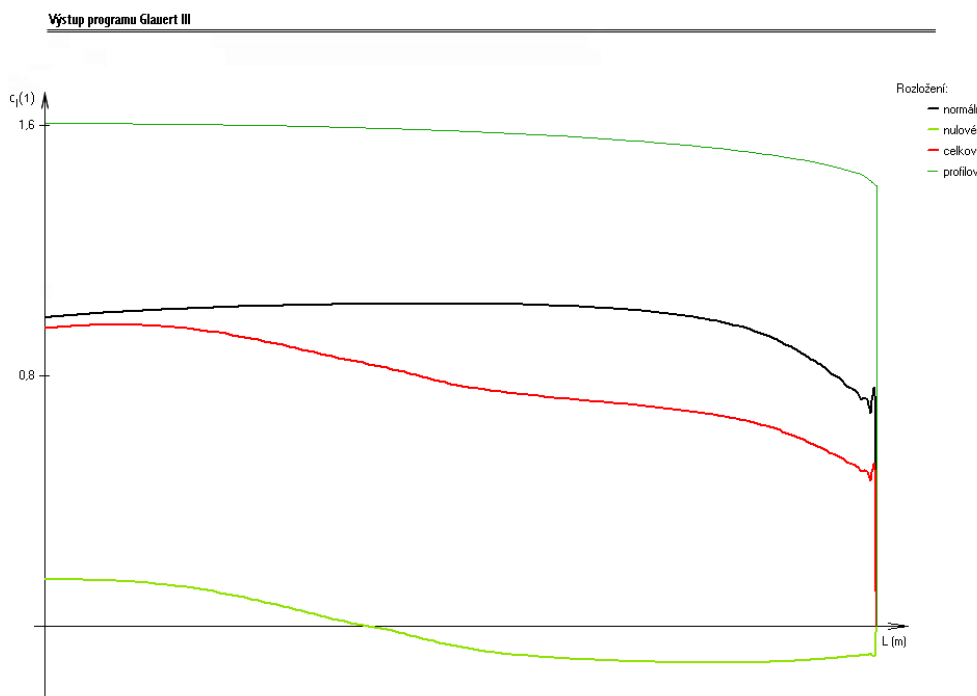
| Konštrukčné skupiny | | | | | |
|---------------------|----------------------------|----------|--------------------------------------|--------|--------|
| Por. Č. Položky | Názov konštrukčnej položky | Hmotnosť | Vzdialenosť ťažiska od počiatku s.s. | | |
| | | m [kg] | x [m] | y [m] | z [m] |
| 1 | TRUP | 132,200 | 3,569 | -0,137 | 0,000 |
| 2 | KRÍDLO | 160,600 | 3,088 | -0,413 | 0,000 |
| 3 | CHVOSTOVÉ PLOCHY | 35,800 | 7,359 | 0,359 | -0,025 |
| 4 | RIADENIE | 28,600 | 2,978 | -0,405 | 0,000 |
| 5 | PODVOZOK | 58,600 | 2,719 | -0,913 | 0,000 |
| 6 | POHONNÁ SÚSTAVA | 295,700 | 1,319 | -0,062 | 0,004 |
| 7 | INŠTALÁCIA MOTOR | 14,600 | 2,528 | -0,392 | -0,033 |
| 8 | VÝSTROJ | 163,500 | 2,738 | -0,144 | 0,047 |
| 9 | P.O, NÁTER, TESNIACE HMOTY | 9,000 | 3,504 | 0,000 | 0,000 |
| Celkom | Prázdné lietadlo | 898,600 | 2,651 | -0,205 | 0,008 |



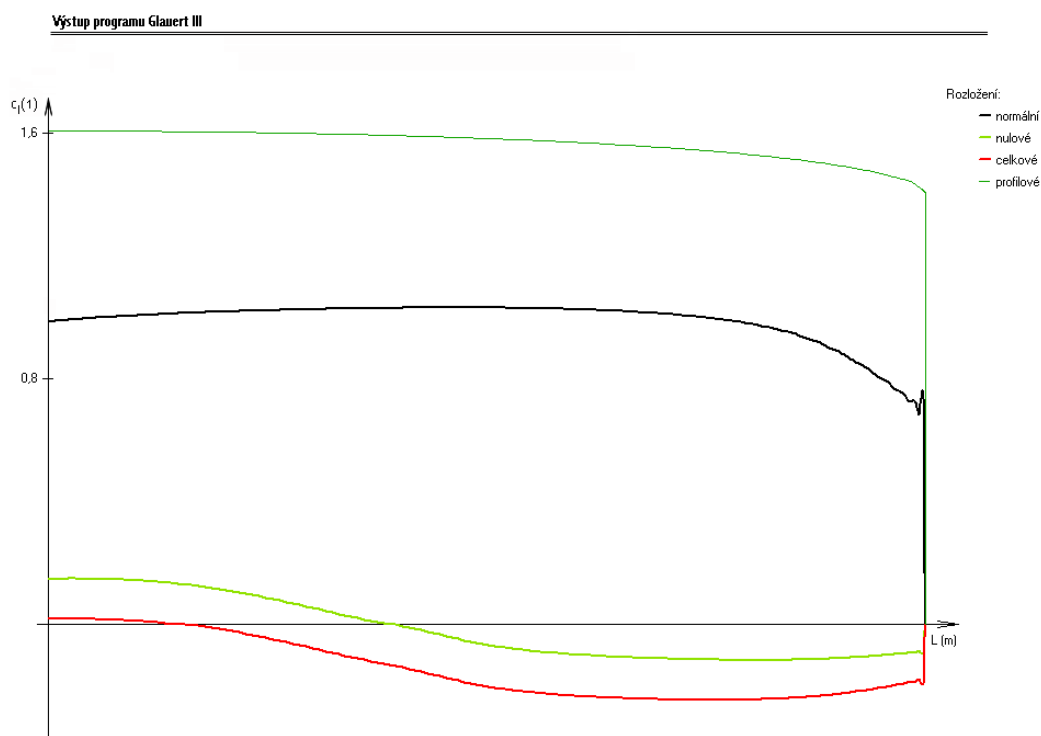
Príloha číslo 2: Výstup z programu Glauert III

V prílohe sú uvedené rozloženia vztlaku len pre významné prípady. Celkový počet výstupov je väčší a je na vyžiadanie k dispozícii.

Pre maximálnu vzletovú hmotnosť a kladný poryv pri cestovnej rýchlosti (bod C obálky)

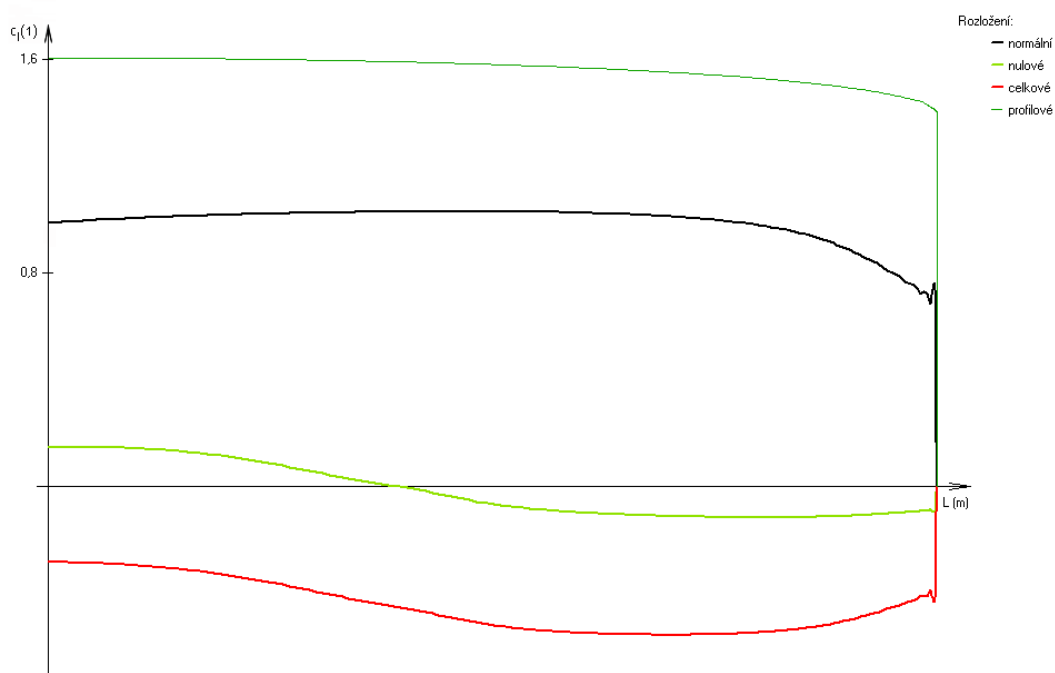


Pre maximálnu vzletovú hmotnosť a záporný poryv pri strmhlavom lete (bod E' obálky)



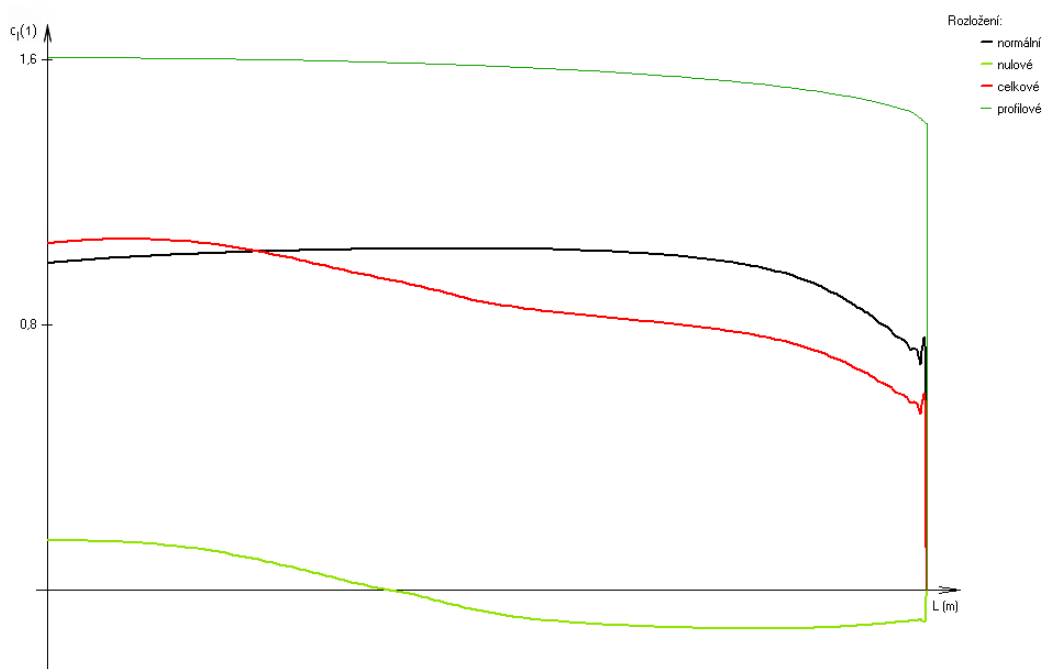
Pre maximálnu vzletovú hmotnosť a záporný poryv pri cestovnej rýchlosti v lete na chrbte (bod F obálky)

Výstup programu Glauert III



Pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí a kladný poryv pri cestovnej rýchlosti (bod C obálky)

Výstup programu Glauert III



Príloha číslo 3: Zaťaženie krídla

V prílohe sú uvedené tabuľky a grafy početného zaťaženia pre prípady maximálnej vzletovej hmotnosti a maximálnej hmotnosti nevztlakových častí. Tabuľky a grafy zo zaťažieniami od aerodynamických síl a od zotrvačných síl pre značnú veľkosť nie sú v prílohe uvedené, ale súk dispozícií.

| | | |
|--------------------------------------|--|-----|
| Tabuľka 1 Početné posúvajúce sily | po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť | 98 |
| Tabuľka 2 Početné posúvajúce sily | po polrozpätí krídla pre nesymetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť | 99 |
| Tabuľka 3 Početné ohybové moment | po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť | 100 |
| Tabuľka 4 Početné ohybové momenty | po polrozpätí krídla pre nesymetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť | 101 |
| Tabuľka 5 Početné krútiace momenyt | po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť | 102 |
| Tabuľka 6 Početné krútiace momenyt | po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť | 103 |
| Tabuľka 7 Početné posúvajúce sily | po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí | 106 |
| Tabuľka 8 Početné posúvajúce sily | po polrozpätí krídla pre nesymetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí | 107 |
| Tabuľka 9 Početné ohýbajúce momenty | po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí | 108 |
| Tabuľka 10 Početné ohýbajúce momenty | po polrozpätí krídla pre nesymetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí | 109 |
| Tabuľka 11 Početné krútiace momenty | po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí | 110 |
| Tabuľka 12 Početné krútiace momenty | po polrozpätí krídla pre nesymetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí | 111 |

Tabuľka 1 Početné posúvajúce sily po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť

| $y[m]$ | A | C | D | E | E' | F | G |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 5,40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5,36 | 38 | 36 | 31 | -11 | -20 | -29 | -19 |
| 5,31 | 159 | 152 | 130 | -47 | -84 | -121 | -79 |
| 5,24 | 396 | 378 | 323 | -115 | -208 | -299 | -197 |
| 5,16 | 770 | 736 | 630 | -222 | -402 | -581 | -382 |
| 5,05 | 1318 | 1260 | 1081 | -377 | -686 | -993 | -653 |
| 4,92 | 2052 | 1963 | 1685 | -583 | -1062 | -1542 | -1015 |
| 4,78 | 2981 | 2853 | 2452 | -840 | -1536 | -2234 | -1472 |
| 4,62 | 4133 | 3959 | 3406 | -1153 | -2118 | -3088 | -2038 |
| 4,44 | 5502 | 5275 | 4544 | -1520 | -2802 | -4097 | -2707 |
| 4,25 | 7099 | 6812 | 5877 | -1938 | -3591 | -5267 | -3485 |
| 4,04 | 8935 | 8583 | 7419 | -2406 | -4484 | -6601 | -4375 |
| 3,82 | 11013 | 10592 | 9174 | -2919 | -5476 | -8096 | -5377 |
| 3,58 | 13325 | 12835 | 11143 | -3463 | -6552 | -9737 | -6484 |
| 3,33 | 15891 | 15335 | 13352 | -4031 | -7707 | -11528 | -7699 |
| 3,07 | 18694 | 18080 | 15799 | -4595 | -8909 | -13437 | -9008 |
| 2,79 | 21761 | 21110 | 18535 | -5122 | -10125 | -15448 | -10411 |
| 2,51 | 25101 | 24456 | 21617 | -5532 | -11274 | -17499 | -11883 |
| 2,27 | 26747 | 26108 | 23145 | -5719 | -11824 | -18498 | -12604 |
| 2,03 | 28455 | 27871 | 24838 | -5742 | -12210 | -19388 | -13295 |
| 1,80 | 30199 | 29712 | 26661 | -5616 | -12442 | -20168 | -13950 |
| 1,58 | 31922 | 31571 | 28553 | -5348 | -12518 | -20818 | -14550 |
| 1,38 | 33587 | 33404 | 30460 | -4964 | -12455 | -21340 | -15088 |
| 1,20 | 35149 | 35148 | 32309 | -4508 | -12293 | -21747 | -15561 |
| 1,04 | 36551 | 36733 | 34010 | -4032 | -12077 | -22057 | -15963 |
| 0,90 | 37756 | 38107 | 35499 | -3583 | -11848 | -22289 | -16296 |
| 0,79 | 39413 | 39930 | 37398 | -3197 | -11782 | -22805 | -16830 |
| 0,71 | 40618 | 41260 | 38786 | -2907 | -11724 | -23171 | -17215 |
| 0,67 | 41347 | 42065 | 39628 | -2727 | -11685 | -23390 | -17447 |
| 0,65 | 41595 | 42340 | 39916 | -2666 | -11670 | -23464 | -17526 |
| 0,64 | 41720 | 42477 | 40060 | -2635 | -11663 | -23501 | -17565 |
| 0,62 | 42093 | 42890 | 40493 | -2541 | -11641 | -23612 | -17683 |
| 0,58 | 42702 | 43564 | 41198 | -2387 | -11604 | -23791 | -17876 |
| 0,53 | 43531 | 44482 | 42161 | -2176 | -11551 | -24033 | -18137 |
| 0,46 | 44583 | 45647 | 43383 | -1904 | -11481 | -24338 | -18467 |
| 0,38 | 45795 | 46991 | 44795 | -1587 | -11396 | -24686 | -18846 |
| 0,30 | 47168 | 48515 | 46397 | -1225 | -11295 | -25077 | -19275 |
| 0,20 | 48672 | 50184 | 48152 | -824 | -11182 | -25502 | -19743 |
| 0,10 | 50242 | 51927 | 49987 | -404 | -11061 | -25945 | -20231 |
| 0,00 | 51861 | 53726 | 51880 | 30 | -10935 | -26400 | -20734 |

Tabuľka 2 Početné posúvajúce sily po polrozpätí krídla pre nesymetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť

| y[m] | Akr- | Akr+ | Ckr+ | Ckr- | Dkr+ | Dkr- | K+ |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5,40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5,36 | 28 | 20 | 18 | 25 | 17 | 13 | 4 |
| 5,31 | 97 | 100 | 96 | 79 | 81 | 48 | 20 |
| 5,24 | 203 | 277 | 275 | 146 | 214 | 104 | 50 |
| 5,16 | 306 | 602 | 617 | 166 | 451 | 161 | 100 |
| 5,05 | 394 | 1122 | 1177 | 113 | 820 | 214 | 177 |
| 4,92 | 482 | 1843 | 1957 | 3 | 1328 | 275 | 286 |
| 4,78 | 575 | 2772 | 2967 | -160 | 1981 | 352 | 436 |
| 4,62 | 684 | 3935 | 4233 | -370 | 2798 | 454 | 639 |
| 4,44 | 821 | 5318 | 5737 | -605 | 3772 | 593 | 909 |
| 4,25 | 1011 | 6917 | 7475 | -835 | 4905 | 787 | 1268 |
| 4,04 | 1300 | 8720 | 9426 | -1005 | 6196 | 1065 | 1758 |
| 3,82 | 1772 | 10673 | 11521 | -996 | 7810 | 1483 | 2454 |
| 3,58 | 2704 | 12588 | 13511 | -435 | 9470 | 2200 | 3597 |
| 3,33 | 4225 | 14405 | 15317 | 846 | 10944 | 3300 | 5297 |
| 3,07 | 6133 | 16244 | 17106 | 2592 | 12511 | 4689 | 7372 |
| 2,79 | 8350 | 18199 | 19009 | 4698 | 14257 | 6359 | 9744 |
| 2,51 | 10845 | 20318 | 21106 | 7140 | 16262 | 8351 | 12366 |
| 2,27 | 14422 | 19137 | 19211 | 11474 | 16087 | 9656 | 14714 |
| 2,03 | 17852 | 18237 | 17721 | 15637 | 16197 | 11118 | 17083 |
| 1,80 | 21089 | 17621 | 16637 | 19572 | 16575 | 12700 | 19419 |
| 1,58 | 24048 | 17286 | 15966 | 23176 | 17193 | 14348 | 21635 |
| 1,38 | 26698 | 17199 | 15664 | 26411 | 18005 | 16013 | 23668 |
| 1,20 | 29012 | 17310 | 15660 | 29241 | 18935 | 17627 | 25456 |
| 1,04 | 30959 | 17554 | 15866 | 31623 | 19894 | 19112 | 26926 |
| 0,90 | 32540 | 17867 | 16189 | 33558 | 20801 | 20410 | 28009 |
| 0,79 | 33823 | 19029 | 17520 | 34981 | 22254 | 21878 | 28757 |
| 0,71 | 34755 | 19879 | 18495 | 36016 | 23320 | 22955 | 29255 |
| 0,67 | 35318 | 20394 | 19089 | 36642 | 23968 | 23609 | 29544 |
| 0,65 | 35510 | 20570 | 19291 | 36856 | 24190 | 23832 | 29641 |
| 0,64 | 35607 | 20658 | 19393 | 36963 | 24301 | 23944 | 29689 |
| 0,62 | 35895 | 20923 | 19699 | 37284 | 24634 | 24281 | 29832 |
| 0,58 | 36364 | 21356 | 20197 | 37807 | 25179 | 24830 | 30062 |
| 0,53 | 37003 | 21946 | 20879 | 38519 | 25924 | 25580 | 30368 |
| 0,46 | 37812 | 22696 | 21746 | 39422 | 26871 | 26534 | 30748 |
| 0,38 | 38743 | 23563 | 22751 | 40461 | 27967 | 27636 | 31175 |
| 0,30 | 39796 | 24549 | 23895 | 41636 | 29213 | 28887 | 31649 |
| 0,20 | 40946 | 25632 | 25153 | 42919 | 30582 | 30261 | 32159 |
| 0,10 | 42142 | 26767 | 26473 | 44255 | 32015 | 31697 | 32685 |
| 0,00 | 43373 | 27942 | 27840 | 45629 | 33496 | 33179 | 33224 |

Tabuľka 3 Početné ohybové moment po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť

| $y[m]$ | A | C | D | E | E' | F | G |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 5,40 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 5,36 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | -0,2 | -0,4 | -0,6 | -0,4 |
| 5,31 | 5,6 | 5,3 | 4,5 | -1,6 | -3,0 | -4,2 | -2,8 |
| 5,24 | 24,7 | 23,6 | 20,2 | -7,2 | -13,0 | -18,7 | -12,3 |
| 5,16 | 75,4 | 72,0 | 61,7 | -21,9 | -39,5 | -57,1 | -37,5 |
| 5,05 | 187,2 | 178,8 | 153,2 | -53,9 | -97,8 | -141,3 | -92,8 |
| 4,92 | 398 | 380 | 326 | -114 | -207 | -300 | -197 |
| 4,78 | 755 | 722 | 620 | -215 | -391 | -568 | -374 |
| 4,62 | 1328 | 1271 | 1091 | -375 | -686 | -996 | -656 |
| 4,44 | 2181 | 2088 | 1795 | -612 | -1121 | -1632 | -1076 |
| 4,25 | 3396 | 3254 | 2801 | -946 | -1738 | -2536 | -1674 |
| 4,04 | 5072 | 4863 | 4190 | -1400 | -2582 | -3776 | -2495 |
| 3,82 | 7306 | 7010 | 6048 | -1996 | -3697 | -5422 | -3587 |
| 3,58 | 10190 | 9787 | 8456 | -2752 | -5123 | -7535 | -4993 |
| 3,33 | 13857 | 13322 | 11530 | -3693 | -6912 | -10204 | -6773 |
| 3,07 | 18387 | 17699 | 15349 | -4823 | -9089 | -13474 | -8962 |
| 2,79 | 23930 | 23068 | 20053 | -6154 | -11697 | -17431 | -11622 |
| 2,51 | 30584 | 29539 | 25754 | -7667 | -14736 | -22110 | -14788 |
| 2,27 | 36884 | 35682 | 31193 | -9034 | -17542 | -26484 | -17763 |
| 2,03 | 43453 | 42106 | 36903 | -10398 | -20402 | -30992 | -20845 |
| 1,80 | 50227 | 48756 | 42851 | -11709 | -23249 | -35561 | -23992 |
| 1,58 | 56998 | 55436 | 48869 | -12904 | -25970 | -40028 | -27098 |
| 1,38 | 63615 | 61999 | 54829 | -13946 | -28492 | -44286 | -30092 |
| 1,20 | 69904 | 68271 | 60573 | -14813 | -30757 | -48229 | -32896 |
| 1,04 | 75640 | 74022 | 65878 | -15496 | -32706 | -51733 | -35418 |
| 0,90 | 80656 | 79073 | 70570 | -16010 | -34321 | -54726 | -37596 |
| 0,79 | 84823 | 83287 | 74507 | -16376 | -35597 | -57161 | -39385 |
| 0,71 | 87944 | 86454 | 77478 | -16614 | -36514 | -58954 | -40712 |
| 0,67 | 89870 | 88412 | 79321 | -16746 | -37064 | -60049 | -41527 |
| 0,65 | 90534 | 89087 | 79957 | -16790 | -37251 | -60423 | -41807 |
| 0,64 | 90867 | 89427 | 80277 | -16811 | -37344 | -60611 | -41947 |
| 0,62 | 91873 | 90451 | 81244 | -16873 | -37624 | -61177 | -42370 |
| 0,58 | 93526 | 92137 | 82837 | -16969 | -38077 | -62101 | -43063 |
| 0,53 | 95812 | 94470 | 85046 | -17090 | -38691 | -63368 | -44018 |
| 0,46 | 98763 | 97489 | 87911 | -17227 | -39462 | -64989 | -45244 |
| 0,38 | 102243 | 101056 | 91306 | -17361 | -40343 | -66876 | -46681 |
| 0,30 | 106287 | 105210 | 95273 | -17483 | -41330 | -69041 | -48339 |
| 0,20 | 110839 | 109898 | 99764 | -17581 | -42398 | -71443 | -50192 |
| 0,10 | 115735 | 114953 | 104622 | -17641 | -43499 | -73990 | -52171 |
| 0,00 | 120943 | 120341 | 109817 | -17661 | -44621 | -76660 | -54260 |

Tabuľka 4 Početné ohybové momenty po polrozpätí krídla pre nesymetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť

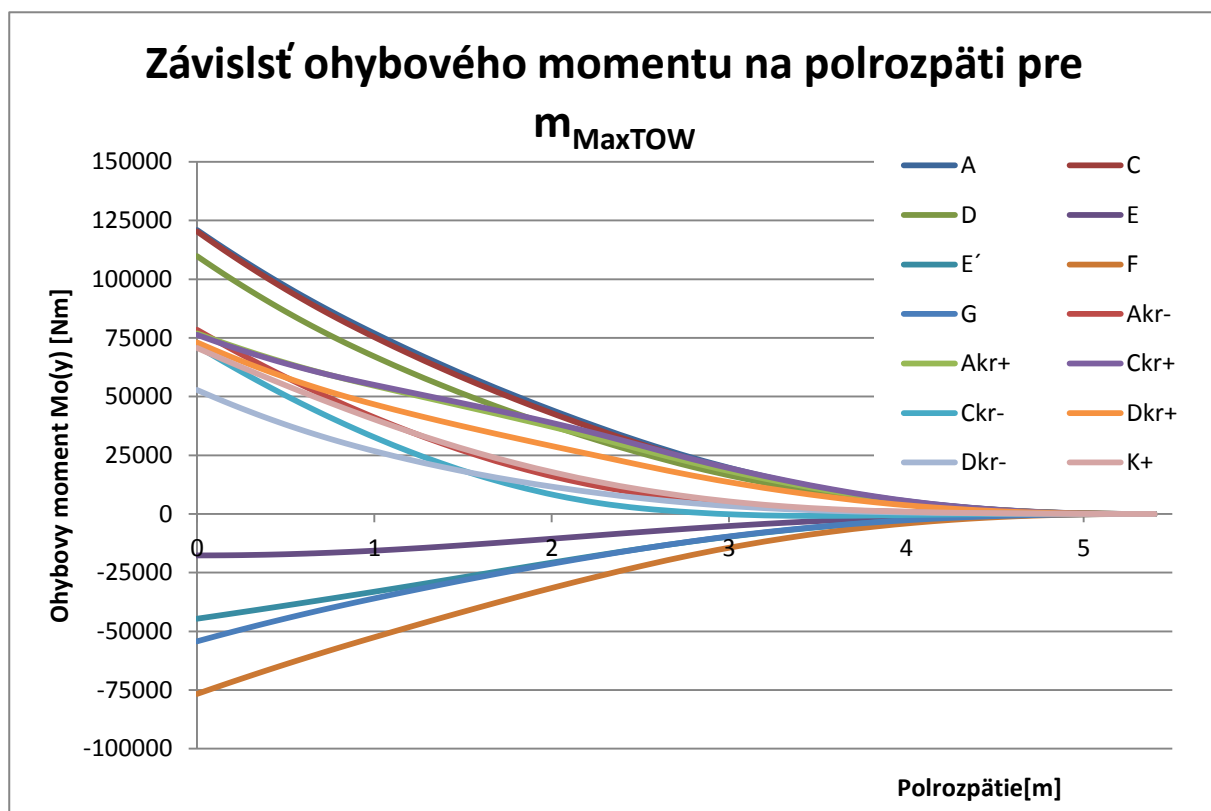
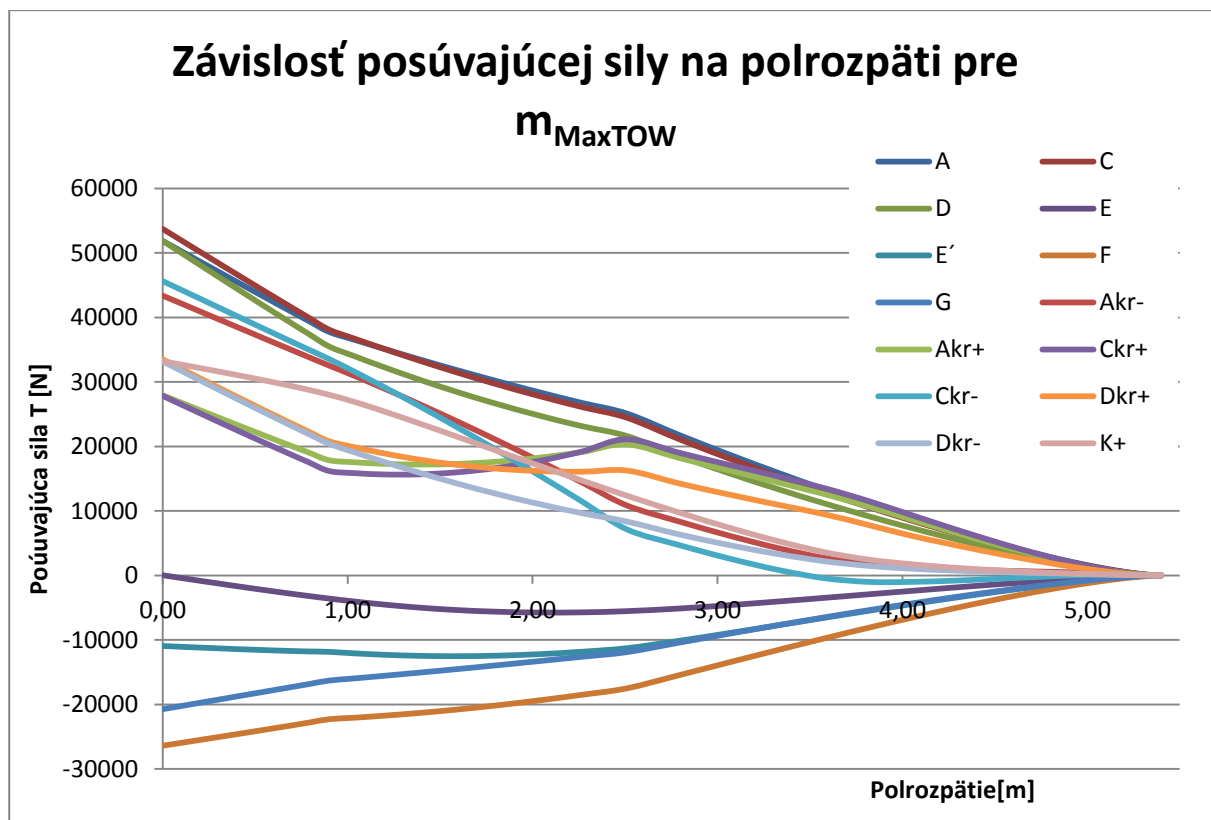
| y[m] | Akr- | Akr+ | Ckr+ | Ckr- | Dkr+ | Dkr- | K+ |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5,40 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 5,36 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| 5,31 | 3,6 | 3,3 | 3,2 | 3,0 | 2,7 | 1,7 | 0,7 |
| 5,24 | 14 | 16 | 16 | 11 | 13 | 7 | 3 |
| 5,16 | 36 | 55 | 55 | 24 | 42 | 18 | 10 |
| 5,05 | 74 | 147 | 151 | 39 | 110 | 39 | 24 |
| 4,92 | 128 | 332 | 347 | 47 | 244 | 69 | 53 |
| 4,78 | 203 | 660 | 696 | 35 | 479 | 114 | 105 |
| 4,62 | 305 | 1200 | 1276 | -7 | 864 | 178 | 191 |
| 4,44 | 438 | 2018 | 2158 | -93 | 1445 | 271 | 328 |
| 4,25 | 615 | 3199 | 3433 | -232 | 2283 | 404 | 538 |
| 4,04 | 856 | 4833 | 5199 | -425 | 3443 | 598 | 854 |
| 3,82 | 1200 | 7005 | 7545 | -649 | 5011 | 883 | 1326 |
| 3,58 | 1731 | 9762 | 10512 | -818 | 7059 | 1320 | 2043 |
| 3,33 | 2600 | 13149 | 14130 | -767 | 9621 | 2010 | 3159 |
| 3,07 | 3957 | 17164 | 18377 | -316 | 12694 | 3056 | 4819 |
| 2,79 | 5941 | 21883 | 23325 | 683 | 16361 | 4570 | 7164 |
| 2,51 | 8667 | 27352 | 29021 | 2364 | 20695 | 6659 | 10303 |
| 2,27 | 11737 | 32146 | 33920 | 4625 | 24625 | 8847 | 13593 |
| 2,03 | 15578 | 36594 | 38315 | 7851 | 28467 | 11319 | 17377 |
| 1,80 | 20075 | 40735 | 42283 | 11918 | 32252 | 14070 | 21593 |
| 1,58 | 24995 | 44540 | 45837 | 16578 | 35933 | 17018 | 26068 |
| 1,38 | 30120 | 48023 | 49031 | 21586 | 39488 | 20085 | 30644 |
| 1,20 | 35218 | 51180 | 51897 | 26678 | 42868 | 23163 | 35138 |
| 1,04 | 40015 | 53970 | 54419 | 31547 | 45974 | 26102 | 39329 |
| 0,90 | 44302 | 56361 | 56583 | 35947 | 48721 | 28770 | 43037 |
| 0,79 | 47885 | 58353 | 58403 | 39648 | 51046 | 31053 | 46102 |
| 0,71 | 50560 | 59870 | 59808 | 42417 | 52823 | 32802 | 48365 |
| 0,67 | 52207 | 60817 | 60691 | 44125 | 53934 | 33896 | 49747 |
| 0,65 | 52773 | 61144 | 60998 | 44713 | 54320 | 34276 | 50220 |
| 0,64 | 53058 | 61309 | 61153 | 45008 | 54514 | 34467 | 50457 |
| 0,62 | 53916 | 61808 | 61622 | 45899 | 55101 | 35045 | 51172 |
| 0,58 | 55325 | 62633 | 62400 | 47363 | 56072 | 36003 | 52340 |
| 0,53 | 57269 | 63780 | 63489 | 49386 | 57426 | 37339 | 53941 |
| 0,46 | 59775 | 65276 | 64916 | 51997 | 59195 | 39085 | 55988 |
| 0,38 | 62723 | 67057 | 66630 | 55072 | 61306 | 41170 | 58372 |
| 0,30 | 66139 | 69150 | 68659 | 58643 | 63794 | 43629 | 61105 |
| 0,20 | 69974 | 71533 | 70988 | 62660 | 66634 | 46438 | 64136 |
| 0,10 | 74087 | 74127 | 73544 | 66975 | 69732 | 49505 | 67346 |
| 0 | 78449 | 76917 | 76314 | 71559 | 73074 | 52814 | 70707 |

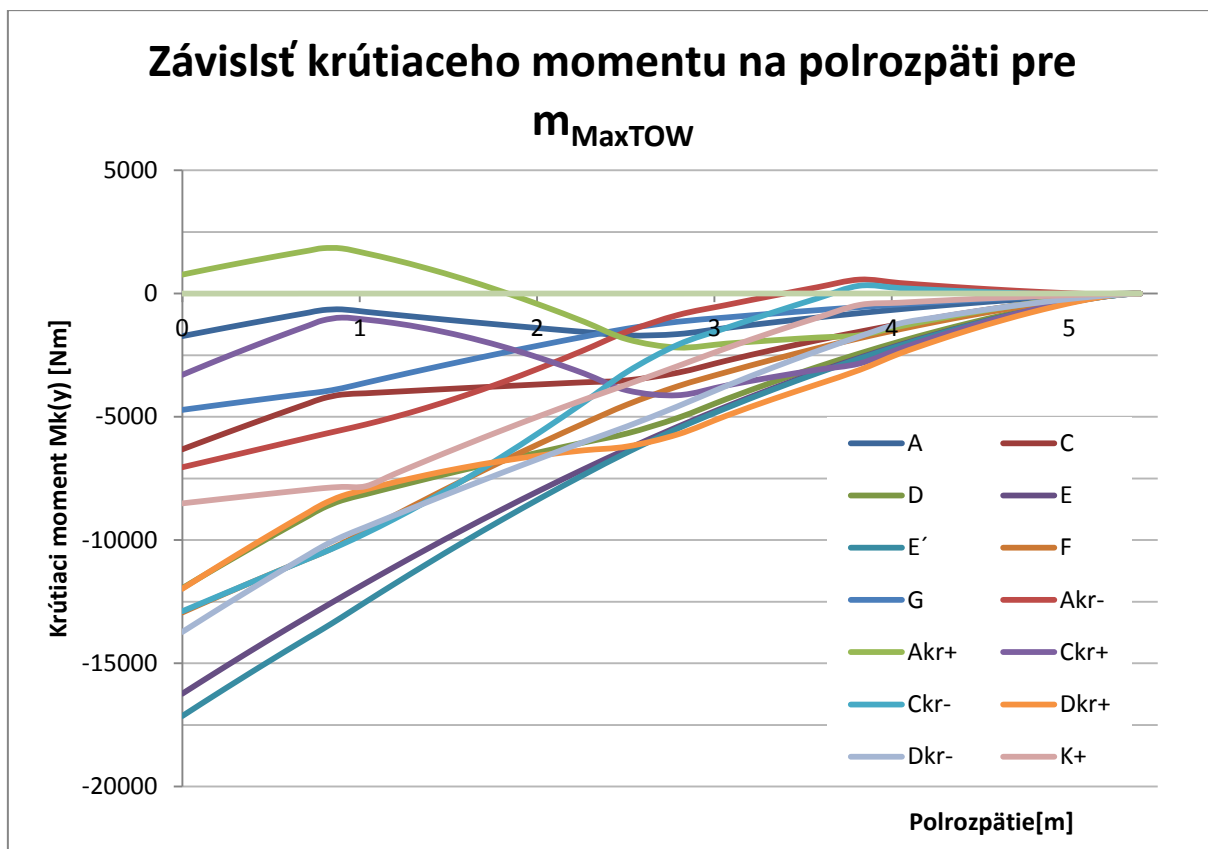
Tabuľka 5 Početné krútiace momenyt po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť

| y[m] | A | C | D | E | E' | F | G |
|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 5,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5,36 | -3,02 | -5,71 | -8,84 | -9,2 | -9,33 | -6,32 | -1,87 |
| 5,31 | -10 | -19 | -30 | -32 | -32 | -22 | -7 |
| 5,24 | -25 | -49 | -77 | -82 | -83 | -56 | -17 |
| 5,16 | -51 | -100 | -156 | -166 | -168 | -115 | -35 |
| 5,05 | -90 | -175 | -275 | -293 | -297 | -204 | -62 |
| 4,92 | -143 | -278 | -436 | -465 | -471 | -323 | -98 |
| 4,78 | -208 | -406 | -637 | -681 | -690 | -473 | -143 |
| 4,62 | -290 | -565 | -887 | -948 | -961 | -659 | -200 |
| 4,44 | -387 | -755 | -1185 | -1268 | -1285 | -882 | -268 |
| 4,25 | -502 | -980 | -1539 | -1646 | -1669 | -1145 | -348 |
| 4,04 | -637 | -1243 | -1953 | -2089 | -2118 | -1454 | -441 |
| 3,82 | -793 | -1547 | -2431 | -2601 | -2637 | -1810 | -550 |
| 3,58 | -970 | -1893 | -2975 | -3183 | -3228 | -2215 | -673 |
| 3,33 | -1170 | -2285 | -3591 | -3844 | -3897 | -2675 | -812 |
| 3,07 | -1394 | -2722 | -4278 | -4579 | -4643 | -3187 | -968 |
| 2,79 | -1643 | -3208 | -5043 | -5399 | -5474 | -3758 | -1141 |
| 2,51 | -1699 | -3518 | -5667 | -6301 | -6435 | -4497 | -1420 |
| 2,27 | -1558 | -3598 | -6036 | -7110 | -7337 | -5258 | -1746 |
| 2,03 | -1413 | -3679 | -6412 | -7938 | -8261 | -6036 | -2079 |
| 1,80 | -1266 | -3760 | -6792 | -8773 | -9192 | -6822 | -2416 |
| 1,58 | -1122 | -3838 | -7161 | -9588 | -10102 | -7589 | -2746 |
| 1,38 | -985 | -3913 | -7515 | -10368 | -10972 | -8323 | -3060 |
| 1,20 | -856 | -3983 | -7843 | -11093 | -11780 | -9005 | -3353 |
| 1,04 | -741 | -4044 | -8135 | -11740 | -12503 | -9615 | -3615 |
| 0,90 | -642 | -4096 | -8386 | -12296 | -13123 | -10139 | -3840 |
| 0,79 | -670 | -4252 | -8699 | -12748 | -13604 | -10509 | -3979 |
| 0,71 | -770 | -4447 | -9006 | -13076 | -13937 | -10738 | -4049 |
| 0,67 | -830 | -4565 | -9191 | -13276 | -14139 | -10876 | -4091 |
| 0,65 | -851 | -4605 | -9255 | -13344 | -14208 | -10924 | -4105 |
| 0,64 | -861 | -4625 | -9287 | -13378 | -14243 | -10948 | -4113 |
| 0,62 | -892 | -4686 | -9382 | -13480 | -14347 | -11019 | -4134 |
| 0,58 | -943 | -4785 | -9538 | -13647 | -14516 | -11136 | -4170 |
| 0,53 | -1012 | -4921 | -9752 | -13876 | -14749 | -11295 | -4218 |
| 0,46 | -1100 | -5094 | -10023 | -14168 | -15044 | -11498 | -4280 |
| 0,38 | -1203 | -5294 | -10338 | -14505 | -15387 | -11733 | -4352 |
| 0,30 | -1319 | -5522 | -10698 | -14891 | -15777 | -12002 | -4433 |
| 0,20 | -1448 | -5774 | -11094 | -15316 | -16208 | -12298 | -4523 |
| 0,10 | -1584 | -6040 | -11512 | -15763 | -16662 | -12610 | -4618 |
| 0,00 | -1725 | -6316 | -11947 | -16230 | -17135 | -12935 | -4717 |

Tabuľka 6 Početné krútiace momenyt po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu vzletovú hmotnosť

| y[m] | Akr- | Akr+ | Ckr+ | Ckr- | Dkr+ | Dkr- | K+ |
|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| 1,41 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1,42 | -4,84 | -1,71 | -4,16 | -8,03 | -8,42 | -9,38 | -1,70 |
| 1,44 | -18 | -4 | -13 | -29 | -28 | -33 | -6 |
| 1,45 | -47 | -10 | -31 | -77 | -72 | -61 | -15 |
| 1,46 | -28 | -64 | -122 | -66 | -170 | -110 | -30 |
| 1,48 | 0 | -146 | -260 | -50 | -319 | -184 | -52 |
| 1,49 | 38 | -257 | -446 | -28 | -520 | -283 | -83 |
| 1,50 | 86 | -397 | -681 | 1 | -773 | -408 | -121 |
| 1,51 | 148 | -572 | -974 | 38 | -1087 | -562 | -169 |
| 1,52 | 225 | -783 | -1328 | 86 | -1464 | -747 | -225 |
| 1,53 | 318 | -1037 | -1750 | 147 | -1912 | -964 | -292 |
| 1,54 | 431 | -1337 | -2251 | 224 | -2439 | -1219 | -371 |
| 1,55 | 567 | -1690 | -2836 | 320 | -3099 | -1739 | -462 |
| 1,56 | 257 | -1783 | -3089 | -193 | -3679 | -2330 | -978 |
| 1,57 | -87 | -1895 | -3387 | -765 | -4281 | -3000 | -1563 |
| 1,57 | -461 | -2029 | -3729 | -1391 | -4954 | -3744 | -2214 |
| 1,58 | -869 | -2188 | -4123 | -2075 | -5711 | -4572 | -2940 |
| 1,58 | -1534 | -1856 | -3929 | -3165 | -6201 | -5381 | -3682 |
| 1,59 | -2287 | -1147 | -3246 | -4397 | -6356 | -6012 | -4297 |
| 1,59 | -2985 | -494 | -2645 | -5559 | -6555 | -6648 | -4926 |
| 1,60 | -3616 | 94 | -2135 | -6635 | -6795 | -7282 | -5561 |
| 1,60 | -4165 | 600 | -1726 | -7595 | -7066 | -7892 | -6180 |
| 1,60 | -4629 | 1024 | -1417 | -8432 | -7358 | -8469 | -6772 |
| 1,60 | -5008 | 1367 | -1197 | -9141 | -7657 | -8998 | -7322 |
| 1,60 | -5306 | 1633 | -1056 | -9719 | -7946 | -9466 | -7814 |
| 1,60 | -5532 | 1832 | -974 | -10175 | -8211 | -9865 | -7842 |
| 1,60 | -5708 | 1841 | -1087 | -10511 | -8543 | -10251 | -7893 |
| 1,60 | -5840 | 1745 | -1288 | -10743 | -8864 | -10580 | -7951 |
| 1,60 | -5919 | 1686 | -1411 | -10882 | -9058 | -10779 | -7987 |
| 1,60 | -5946 | 1666 | -1453 | -10930 | -9125 | -10847 | -7999 |
| 1,60 | -5959 | 1656 | -1474 | -10953 | -9158 | -10881 | -8005 |
| 1,60 | -6000 | 1626 | -1537 | -11025 | -9259 | -10983 | -8023 |
| 1,60 | -6065 | 1576 | -1641 | -11141 | -9423 | -11150 | -8053 |
| 1,60 | -6155 | 1507 | -1784 | -11299 | -9647 | -11379 | -8093 |
| 1,60 | -6268 | 1419 | -1967 | -11500 | -9934 | -11670 | -8145 |
| 1,60 | -6398 | 1316 | -2181 | -11731 | -10266 | -12007 | -8204 |
| 1,61 | -6545 | 1196 | -2426 | -11992 | -10647 | -12391 | -8273 |
| 1,61 | -6705 | 1063 | -2699 | -12278 | -11067 | -12814 | -8348 |
| 1,61 | -6872 | 920 | -2990 | -12577 | -11511 | -13260 | -8427 |
| 1,61 | -7043 | 770 | -3295 | -12885 | -11975 | -13725 | -8510 |





Tabuľka 7 Početné posúvajúce sily po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí

| y[m] | A | C | D | E | E' | F | G |
|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 5,40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5,36 | 32 | 34 | 25 | -11 | -21 | -30 | -17 |
| 5,31 | 136 | 144 | 106 | -47 | -89 | -125 | -70 |
| 5,24 | 337 | 358 | 265 | -115 | -220 | -311 | -173 |
| 5,16 | 657 | 699 | 517 | -222 | -428 | -604 | -337 |
| 5,05 | 1124 | 1197 | 887 | -377 | -729 | -1032 | -575 |
| 4,92 | 1751 | 1865 | 1384 | -583 | -1130 | -1602 | -895 |
| 4,78 | 2545 | 2713 | 2017 | -840 | -1634 | -2322 | -1298 |
| 4,62 | 3531 | 3766 | 2805 | -1153 | -2255 | -3212 | -1797 |
| 4,44 | 4702 | 5020 | 3745 | -1520 | -2985 | -4263 | -2387 |
| 4,25 | 6070 | 6486 | 4849 | -1938 | -3826 | -5481 | -3074 |
| 4,04 | 7643 | 8175 | 6128 | -2406 | -4780 | -6872 | -3859 |
| 3,82 | 9425 | 10092 | 7587 | -2919 | -5841 | -8430 | -4742 |
| 3,58 | 11409 | 12233 | 9228 | -3463 | -6994 | -10143 | -5718 |
| 3,33 | 13613 | 14621 | 11074 | -4031 | -8233 | -12012 | -6788 |
| 3,07 | 16022 | 17244 | 13128 | -4595 | -9526 | -14005 | -7940 |
| 2,79 | 18663 | 20142 | 15438 | -5122 | -10842 | -16107 | -9172 |
| 2,51 | 21548 | 23346 | 18065 | -5532 | -12098 | -18257 | -10463 |
| 2,27 | 24148 | 26277 | 20547 | -5719 | -13027 | -20031 | -11565 |
| 2,03 | 26811 | 29321 | 23195 | -5742 | -13794 | -21699 | -12638 |
| 1,80 | 29501 | 32430 | 25965 | -5616 | -14403 | -23250 | -13672 |
| 1,58 | 32135 | 35510 | 28768 | -5348 | -14840 | -24640 | -14637 |
| 1,38 | 34659 | 38491 | 31534 | -4964 | -15118 | -25858 | -15518 |
| 1,20 | 37011 | 41292 | 34173 | -4508 | -15269 | -26905 | -16307 |
| 1,04 | 39112 | 43811 | 36574 | -4032 | -15329 | -27781 | -16989 |
| 0,90 | 40915 | 45982 | 38659 | -3583 | -15335 | -28495 | -17560 |
| 0,79 | 42373 | 47744 | 40361 | -3197 | -15316 | -29054 | -18015 |
| 0,71 | 43435 | 49028 | 41606 | -2907 | -15290 | -29451 | -18343 |
| 0,67 | 44077 | 49807 | 42361 | -2727 | -15271 | -29688 | -18540 |
| 0,65 | 44297 | 50072 | 42619 | -2666 | -15264 | -29769 | -18607 |
| 0,64 | 44406 | 50205 | 42749 | -2635 | -15260 | -29809 | -18641 |
| 0,62 | 44736 | 50605 | 43137 | -2541 | -15249 | -29929 | -18742 |
| 0,58 | 45272 | 51256 | 43770 | -2387 | -15229 | -30124 | -18905 |
| 0,53 | 46003 | 52143 | 44635 | -2176 | -15198 | -30387 | -19127 |
| 0,46 | 46931 | 53270 | 45733 | -1904 | -15157 | -30718 | -19407 |
| 0,38 | 48000 | 54569 | 47002 | -1587 | -15105 | -31097 | -19729 |
| 0,30 | 49211 | 56042 | 48442 | -1225 | -15042 | -31523 | -20093 |
| 0,20 | 50538 | 57656 | 50020 | -824 | -14970 | -31986 | -20490 |
| 0,10 | 51923 | 59342 | 51670 | -404 | -14892 | -32468 | -20904 |
| 0,00 | 53351 | 61081 | 53372 | 30 | -14810 | -32964 | -21331 |

Tabuľka 8 Početné posúvajúce sily po polrozpätí krídla pre nesymetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí

| y[m] | Akr- | Akr+ | Ckr+ | Ckr- | Dkr+ | Dkr- | K+ |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| 1,42 | 37 | 3 | -3 | 38 | 6 | 23 | 2 |
| 1,44 | 125 | 41 | 22 | 121 | 41 | 81 | 10 |
| 1,45 | 263 | 139 | 103 | 240 | 121 | 177 | 27 |
| 1,46 | 413 | 343 | 297 | 335 | 274 | 290 | 54 |
| 1,48 | 561 | 696 | 651 | 381 | 528 | 418 | 98 |
| 1,49 | 720 | 1204 | 1171 | 388 | 887 | 568 | 163 |
| 1,50 | 889 | 1877 | 1868 | 358 | 1359 | 742 | 256 |
| 1,51 | 1078 | 2737 | 2766 | 294 | 1960 | 949 | 388 |
| 1,52 | 1295 | 3777 | 3856 | 211 | 2686 | 1195 | 573 |
| 1,53 | 1564 | 4992 | 5132 | 137 | 3539 | 1496 | 834 |
| 1,54 | 1926 | 6371 | 6576 | 125 | 4518 | 1878 | 1211 |
| 1,55 | 2463 | 7865 | 8123 | 287 | 5933 | 2393 | 1778 |
| 1,56 | 3447 | 9290 | 9532 | 992 | 7376 | 3196 | 2778 |
| 1,57 | 5003 | 10587 | 10724 | 2403 | 8456 | 4366 | 4321 |
| 1,57 | 6927 | 11887 | 11880 | 4259 | 9609 | 5806 | 6225 |
| 1,58 | 9135 | 13284 | 13133 | 6448 | 10920 | 7500 | 8411 |
| 1,58 | 11591 | 14833 | 14571 | 8942 | 12475 | 9487 | 10835 |
| 1,59 | 13817 | 16275 | 15971 | 11252 | 14023 | 11409 | 13009 |
| 1,59 | 16093 | 17803 | 17513 | 13657 | 15751 | 13490 | 15204 |
| 1,60 | 18381 | 19397 | 19175 | 16109 | 17625 | 15688 | 17371 |
| 1,60 | 20607 | 21009 | 20904 | 18527 | 19585 | 17929 | 19424 |
| 1,60 | 22724 | 22601 | 22655 | 20856 | 21574 | 20156 | 21306 |
| 1,60 | 24681 | 24122 | 24360 | 23030 | 23514 | 22288 | 22956 |
| 1,60 | 26416 | 25510 | 25939 | 24972 | 25310 | 24233 | 24304 |
| 1,60 | 27895 | 26722 | 27331 | 26634 | 26890 | 25923 | 25286 |
| 1,60 | 29083 | 27715 | 28480 | 27975 | 28190 | 27302 | 25947 |
| 1,60 | 29944 | 28445 | 29327 | 28947 | 29147 | 28310 | 26383 |
| 1,60 | 30463 | 28889 | 29845 | 29534 | 29730 | 28921 | 26635 |
| 1,60 | 30639 | 29041 | 30022 | 29734 | 29930 | 29130 | 26719 |
| 1,60 | 30728 | 29117 | 30111 | 29834 | 30030 | 29235 | 26760 |
| 1,60 | 30993 | 29346 | 30379 | 30134 | 30330 | 29549 | 26884 |
| 1,60 | 31424 | 29721 | 30817 | 30622 | 30822 | 30061 | 27083 |
| 1,60 | 32010 | 30233 | 31417 | 31285 | 31494 | 30759 | 27346 |
| 1,60 | 32750 | 30887 | 32183 | 32123 | 32351 | 31645 | 27672 |
| 1,60 | 33599 | 31645 | 33074 | 33085 | 33344 | 32667 | 28038 |
| 1,61 | 34556 | 32510 | 34093 | 34169 | 34475 | 33825 | 28442 |
| 1,61 | 35597 | 33465 | 35220 | 35348 | 35720 | 35091 | 28875 |
| 1,61 | 36677 | 34470 | 36408 | 36569 | 37026 | 36411 | 29321 |
| 1,61 | 37783 | 35516 | 37645 | 37818 | 38379 | 37768 | 29777 |

Tabuľka 9 Početné ohýbajúce momenty po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí

| y[m] | A | C | D | E | E' | F | G |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 5,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5,36 | 0,63 | 0,66 | 0,49 | -0,22 | -0,42 | -0,58 | -0,32 |
| 5,31 | 5 | 5 | 4 | -2 | -3 | -4 | -2 |
| 5,24 | 21 | 22 | 16 | -7 | -14 | -19 | -11 |
| 5,16 | 64 | 68 | 50 | -22 | -42 | -59 | -33 |
| 5,05 | 160 | 170 | 126 | -54 | -104 | -147 | -82 |
| 4,92 | 339 | 361 | 268 | -114 | -220 | -311 | -174 |
| 4,78 | 644 | 686 | 509 | -215 | -416 | -590 | -329 |
| 4,62 | 1133 | 1208 | 897 | -375 | -729 | -1036 | -578 |
| 4,44 | 1862 | 1985 | 1477 | -612 | -1193 | -1697 | -949 |
| 4,25 | 2901 | 3096 | 2306 | -946 | -1850 | -2637 | -1476 |
| 4,04 | 4334 | 4628 | 3453 | -1400 | -2750 | -3928 | -2200 |
| 3,82 | 6246 | 6674 | 4989 | -1996 | -3939 | -5642 | -3164 |
| 3,58 | 8715 | 9319 | 6982 | -2752 | -5460 | -7843 | -4403 |
| 3,33 | 11855 | 12689 | 9530 | -3693 | -7371 | -10623 | -5973 |
| 3,07 | 15737 | 16864 | 12700 | -4823 | -9698 | -14031 | -7902 |
| 2,79 | 20489 | 21985 | 16614 | -6154 | -12488 | -18157 | -10246 |
| 2,51 | 26199 | 28161 | 21372 | -7667 | -15746 | -23036 | -13035 |
| 2,27 | 31751 | 34190 | 26063 | -9034 | -18798 | -27688 | -15711 |
| 2,03 | 37815 | 40806 | 31268 | -10398 | -21990 | -32654 | -18591 |
| 1,80 | 44319 | 47938 | 36946 | -11709 | -25247 | -37846 | -21630 |
| 1,58 | 51037 | 55344 | 42912 | -12904 | -28434 | -43066 | -24716 |
| 1,38 | 57784 | 62818 | 49002 | -13946 | -31460 | -48166 | -27761 |
| 1,20 | 64341 | 70118 | 55015 | -14813 | -34240 | -52994 | -30673 |
| 1,04 | 70431 | 76926 | 60674 | -15496 | -36688 | -57369 | -33337 |
| 0,90 | 75833 | 82987 | 65753 | -16010 | -38758 | -61168 | -35669 |
| 0,79 | 80331 | 88049 | 70020 | -16376 | -40413 | -64275 | -37590 |
| 0,71 | 83677 | 91823 | 73216 | -16614 | -41607 | -66557 | -39008 |
| 0,67 | 85734 | 94145 | 75190 | -16746 | -42325 | -67947 | -39875 |
| 0,65 | 86441 | 94944 | 75869 | -16790 | -42569 | -68422 | -40172 |
| 0,64 | 86795 | 95346 | 76211 | -16811 | -42691 | -68661 | -40321 |
| 0,62 | 87865 | 96555 | 77242 | -16873 | -43057 | -69377 | -40770 |
| 0,58 | 89620 | 98542 | 78936 | -16969 | -43652 | -70549 | -41504 |
| 0,53 | 92039 | 101282 | 81279 | -17090 | -44458 | -72152 | -42512 |
| 0,46 | 95152 | 104813 | 84306 | -17227 | -45475 | -74199 | -43802 |
| 0,38 | 98807 | 108965 | 87877 | -17361 | -46640 | -76579 | -45309 |
| 0,30 | 103036 | 113776 | 92029 | -17483 | -47951 | -79303 | -47041 |
| 0,20 | 107774 | 119177 | 96705 | -17581 | -49377 | -82320 | -48969 |
| 0,10 | 112846 | 124968 | 101739 | -17641 | -50855 | -85510 | -51018 |
| 0,00 | 118215 | 131110 | 107096 | -17661 | -52370 | -88847 | -53172 |

Tabuľka 10 Početné ohýbajúce momenty po polrozpätí krídla pre nesymetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí

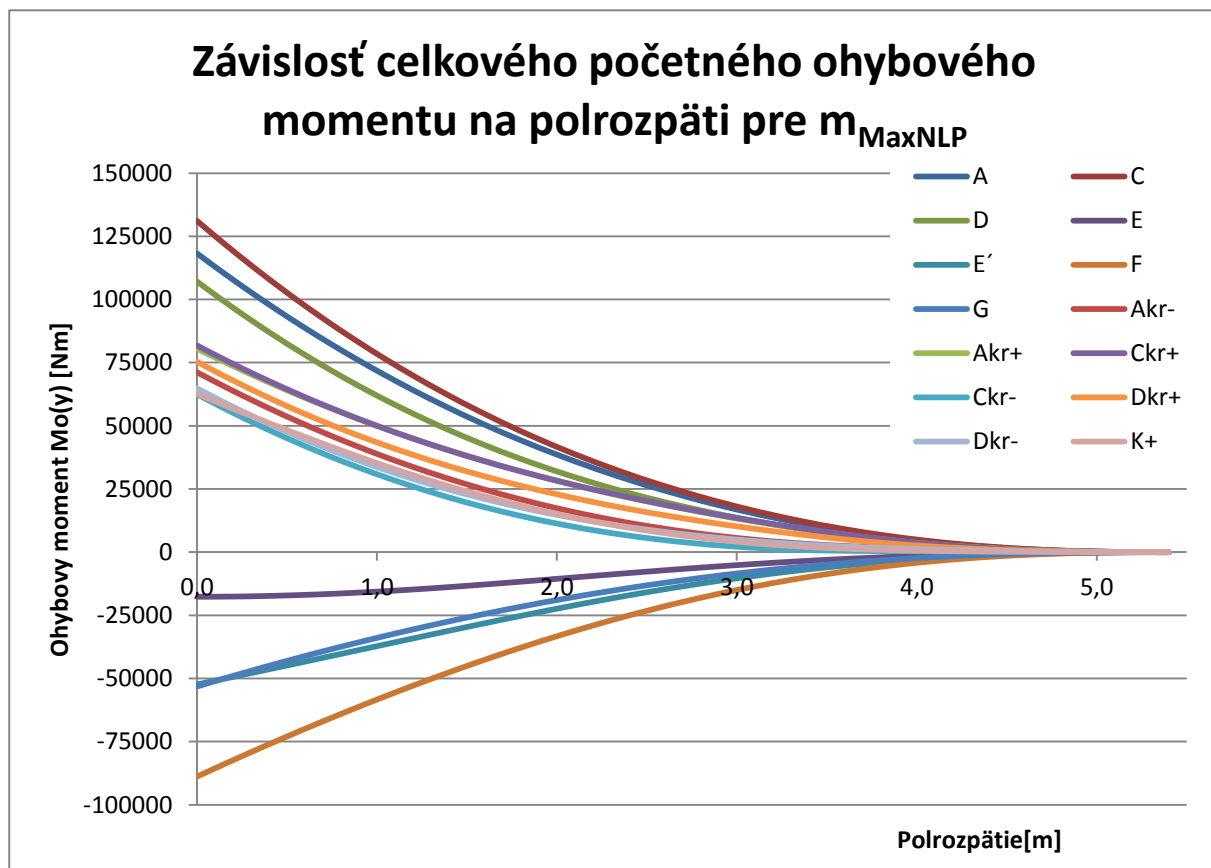
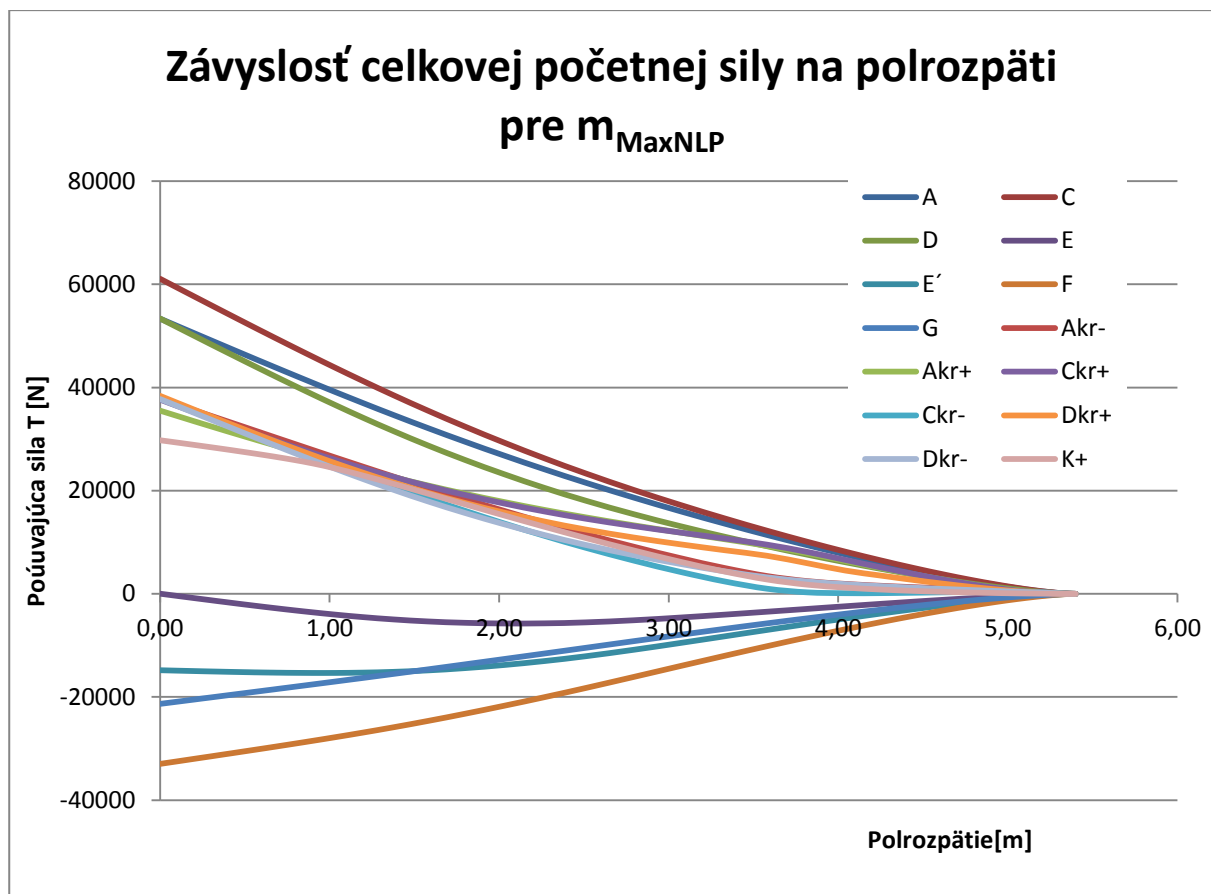
| y[m] | Akr- | Akr+ | Ckr+ | Ckr- | Dkr+ | Dkr- | K+ |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5,36 | 0,72 | 0,06 | -0,06 | 0,75 | 0,12 | 0,46 | 0,05 |
| 5,31 | 5 | 1 | 0 | 5 | 1 | 3 | 0 |
| 5,24 | 18 | 7 | 5 | 17 | 7 | 12 | 2 |
| 5,16 | 47 | 28 | 22 | 42 | 24 | 32 | 5 |
| 5,05 | 100 | 84 | 73 | 80 | 67 | 70 | 13 |
| 4,92 | 180 | 203 | 187 | 129 | 155 | 132 | 30 |
| 4,78 | 294 | 421 | 402 | 182 | 315 | 225 | 59 |
| 4,62 | 452 | 793 | 775 | 234 | 582 | 361 | 111 |
| 4,44 | 662 | 1369 | 1362 | 279 | 993 | 551 | 196 |
| 4,25 | 938 | 2216 | 2229 | 312 | 1594 | 810 | 332 |
| 4,04 | 1303 | 3403 | 3452 | 340 | 2436 | 1163 | 546 |
| 3,82 | 1794 | 4998 | 5099 | 386 | 3607 | 1641 | 881 |
| 3,58 | 2495 | 7030 | 7191 | 538 | 5184 | 2304 | 1421 |
| 3,33 | 3555 | 9525 | 9733 | 964 | 7171 | 3253 | 2311 |
| 3,07 | 5118 | 12469 | 12694 | 1836 | 9537 | 4585 | 3693 |
| 2,79 | 7319 | 15917 | 16121 | 3303 | 12350 | 6408 | 5698 |
| 2,51 | 10262 | 19910 | 20055 | 5489 | 15672 | 8820 | 8431 |
| 2,27 | 13349 | 23690 | 23766 | 7942 | 18891 | 11359 | 11328 |
| 2,03 | 16908 | 27745 | 27750 | 10906 | 22434 | 14322 | 14685 |
| 1,80 | 20890 | 32041 | 31988 | 14344 | 26289 | 17692 | 18448 |
| 1,58 | 25140 | 36446 | 36356 | 18120 | 30345 | 21356 | 22459 |
| 1,38 | 29516 | 40850 | 40756 | 22098 | 34502 | 25203 | 26572 |
| 1,20 | 33853 | 45125 | 45057 | 26113 | 38627 | 29086 | 30622 |
| 1,04 | 37941 | 49096 | 49081 | 29953 | 42533 | 32808 | 34403 |
| 0,90 | 41607 | 52622 | 52677 | 33437 | 46057 | 36194 | 37750 |
| 0,79 | 44684 | 55561 | 55691 | 36386 | 49031 | 39068 | 40517 |
| 0,71 | 46986 | 57751 | 57945 | 38606 | 51267 | 41237 | 42558 |
| 0,67 | 48406 | 59099 | 59336 | 39980 | 52651 | 42582 | 43804 |
| 0,65 | 48894 | 59562 | 59815 | 40454 | 53128 | 43046 | 44230 |
| 0,64 | 49140 | 59795 | 60055 | 40692 | 53368 | 43280 | 44444 |
| 0,62 | 49881 | 60496 | 60781 | 41412 | 54092 | 43985 | 45088 |
| 0,58 | 51098 | 61648 | 61975 | 42597 | 55285 | 45147 | 46140 |
| 0,53 | 52779 | 63237 | 63624 | 44237 | 56936 | 46759 | 47583 |
| 0,46 | 54948 | 65285 | 65754 | 46361 | 59075 | 48850 | 49426 |
| 0,38 | 57503 | 67692 | 68267 | 48872 | 61604 | 51326 | 51571 |
| 0,30 | 60467 | 70483 | 71188 | 51797 | 64554 | 54218 | 54028 |
| 0,20 | 63800 | 73617 | 74481 | 55100 | 67889 | 57491 | 56750 |
| 0,10 | 67377 | 76979 | 78026 | 58659 | 71490 | 61031 | 59631 |
| 0,00 | 71175 | 80549 | 81803 | 62453 | 75335 | 64814 | 62645 |

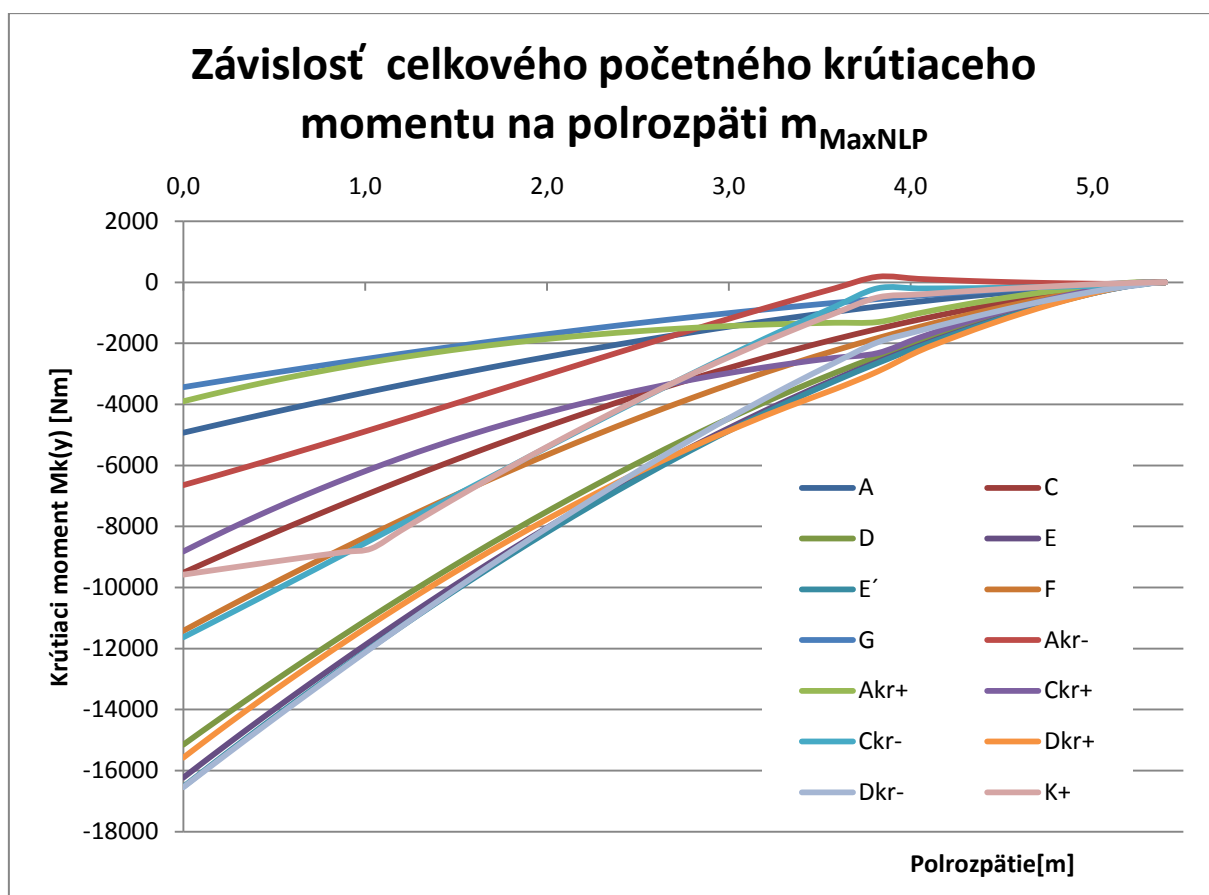
Tabuľka 11 Početné krútiace momenty po polrozpätí krídla pre symetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevztlakových častí

| y[m] | A | C | D | E | E' | F | G |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 5,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5,36 | -3,02 | -5,67 | -8,84 | -9,24 | -9,35 | -6,37 | -1,87 |
| 5,31 | -10,12 | -19,22 | -30,25 | -31,9 | -32,43 | -22,23 | -6,60 |
| 5,24 | -25 | -49 | -77 | -82 | -83 | -57 | -17 |
| 5,16 | -51 | -98 | -156 | -166 | -169 | -116 | -35 |
| 5,05 | -90 | -174 | -275 | -293 | -298 | -206 | -62 |
| 4,92 | -143 | -275 | -436 | -465 | -473 | -326 | -98 |
| 4,78 | -208 | -401 | -637 | -681 | -693 | -478 | -143 |
| 4,62 | -290 | -558 | -887 | -948 | -965 | -666 | -200 |
| 4,44 | -387 | -746 | -1185 | -1268 | -1291 | -891 | -268 |
| 4,25 | -502 | -968 | -1539 | -1646 | -1676 | -1157 | -348 |
| 4,04 | -637 | -1228 | -1953 | -2089 | -2127 | -1468 | -441 |
| 3,82 | -793 | -1528 | -2431 | -2601 | -2648 | -1828 | -550 |
| 3,58 | -970 | -1870 | -2975 | -3183 | -3242 | -2238 | -673 |
| 3,33 | -1170 | -2258 | -3591 | -3844 | -3914 | -2703 | -812 |
| 3,07 | -1394 | -2689 | -4278 | -4579 | -4663 | -3220 | -968 |
| 2,79 | -1643 | -3170 | -5043 | -5399 | -5498 | -3797 | -1141 |
| 2,51 | -1917 | -3699 | -5885 | -6301 | -6416 | -4431 | -1332 |
| 2,27 | -2163 | -4174 | -6641 | -7110 | -7241 | -5001 | -1504 |
| 2,03 | -2414 | -4659 | -7414 | -7938 | -8084 | -5583 | -1679 |
| 1,80 | -2668 | -5148 | -8193 | -8773 | -8935 | -6171 | -1856 |
| 1,58 | -2915 | -5626 | -8954 | -9588 | -9765 | -6745 | -2029 |
| 1,38 | -3151 | -6083 | -9682 | -10368 | -10559 | -7294 | -2194 |
| 1,20 | -3371 | -6508 | -10358 | -11093 | -11297 | -7804 | -2347 |
| 1,04 | -3568 | -6887 | -10962 | -11740 | -11957 | -8260 | -2484 |
| 0,90 | -3736 | -7213 | -11481 | -12296 | -12523 | -8651 | -2602 |
| 0,79 | -3873 | -7477 | -11902 | -12748 | -12983 | -8969 | -2698 |
| 0,71 | -3973 | -7670 | -12208 | -13076 | -13318 | -9200 | -2768 |
| 0,67 | -4033 | -7786 | -12394 | -13276 | -13521 | -9341 | -2810 |
| 0,65 | -4053 | -7826 | -12458 | -13344 | -13590 | -9388 | -2824 |
| 0,64 | -4064 | -7846 | -12489 | -13378 | -13625 | -9412 | -2831 |
| 0,62 | -4095 | -7906 | -12585 | -13480 | -13729 | -9484 | -2853 |
| 0,58 | -4145 | -8004 | -12741 | -13647 | -13900 | -9602 | -2889 |
| 0,53 | -4215 | -8138 | -12954 | -13876 | -14133 | -9763 | -2937 |
| 0,46 | -4303 | -8309 | -13226 | -14168 | -14430 | -9969 | -2999 |
| 0,38 | -4405 | -8506 | -13541 | -14505 | -14774 | -10206 | -3070 |
| 0,30 | -4522 | -8732 | -13901 | -14891 | -15166 | -10478 | -3152 |
| 0,20 | -4651 | -8981 | -14297 | -15316 | -15599 | -10777 | -3242 |
| 0,10 | -4787 | -9243 | -14715 | -15763 | -16055 | -11092 | -3337 |
| 0,00 | -4928 | -9516 | -15150 | -16230 | -16530 | -11420 | -3436 |

Tabuľka 12 Početné krútiace momenty po polrozpätí krídla pre nesymetrické prípady pre maximálnu hmotnosť nevzlakových častí

| y[m] | Akr- | Akr+ | Ckr+ | Ckr- | Dkr+ | Dkr- | K+ |
|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| 5,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5,36 | -5,92 | -0,63 | -2,71 | -9,48 | -7,83 | -10,60 | -1,78 |
| 5,31 | -23 | 0 | -7 | -36 | -26 | -38 | -6 |
| 5,24 | -60 | 3 | -14 | -94 | -65 | -98 | -16 |
| 5,16 | -55 | -38 | -86 | -102 | -156 | -162 | -32 |
| 5,05 | -48 | -99 | -196 | -114 | -293 | -260 | -56 |
| 4,92 | -38 | -181 | -344 | -130 | -479 | -391 | -89 |
| 4,78 | -25 | -286 | -532 | -148 | -712 | -555 | -130 |
| 4,62 | -5 | -419 | -769 | -166 | -1003 | -756 | -181 |
| 4,44 | 23 | -582 | -1058 | -183 | -1354 | -995 | -243 |
| 4,25 | 61 | -780 | -1407 | -196 | -1771 | -1275 | -315 |
| 4,04 | 113 | -1019 | -1825 | -201 | -2264 | -1599 | -400 |
| 3,82 | 182 | -1304 | -2320 | -196 | -2924 | -1969 | -498 |
| 3,58 | -200 | -1325 | -2477 | -806 | -3505 | -2641 | -1022 |
| 3,33 | -621 | -1361 | -2671 | -1480 | -4064 | -3397 | -1616 |
| 3,07 | -1075 | -1416 | -2908 | -2212 | -4695 | -4230 | -2277 |
| 2,79 | -1564 | -1494 | -3194 | -3004 | -5407 | -5150 | -3015 |
| 2,51 | -2082 | -1600 | -3536 | -3849 | -6202 | -6151 | -3827 |
| 2,27 | -2531 | -1711 | -3864 | -4586 | -6924 | -7040 | -4555 |
| 2,03 | -2974 | -1840 | -4220 | -5319 | -7671 | -7941 | -5299 |
| 1,80 | -3406 | -1985 | -4601 | -6038 | -8433 | -8842 | -6051 |
| 1,58 | -3813 | -2142 | -4991 | -6720 | -9185 | -9713 | -6784 |
| 1,38 | -4189 | -2304 | -5382 | -7356 | -9911 | -10540 | -7486 |
| 1,20 | -4528 | -2466 | -5760 | -7931 | -10592 | -11302 | -8138 |
| 1,04 | -4823 | -2619 | -6109 | -8434 | -11205 | -11978 | -8721 |
| 0,90 | -5069 | -2757 | -6417 | -8858 | -11735 | -12555 | -8827 |
| 0,79 | -5264 | -2874 | -6674 | -9195 | -12168 | -13021 | -8913 |
| 0,71 | -5404 | -2961 | -6864 | -9438 | -12484 | -13359 | -8976 |
| 0,67 | -5488 | -3015 | -6980 | -9584 | -12677 | -13563 | -9014 |
| 0,65 | -5516 | -3034 | -7020 | -9633 | -12742 | -13633 | -9027 |
| 0,64 | -5531 | -3043 | -7040 | -9658 | -12775 | -13667 | -9034 |
| 0,62 | -5573 | -3071 | -7100 | -9732 | -12874 | -13772 | -9053 |
| 0,58 | -5642 | -3117 | -7200 | -9853 | -13036 | -13943 | -9085 |
| 0,53 | -5736 | -3182 | -7337 | -10017 | -13259 | -14177 | -9129 |
| 0,46 | -5854 | -3265 | -7513 | -10224 | -13542 | -14473 | -9185 |
| 0,38 | -5989 | -3364 | -7720 | -10462 | -13872 | -14815 | -9249 |
| 0,30 | -6140 | -3479 | -7960 | -10729 | -14250 | -15204 | -9323 |
| 0,20 | -6304 | -3608 | -8228 | -11020 | -14669 | -15632 | -9404 |
| 0,10 | -6473 | -3749 | -8515 | -11322 | -15111 | -16081 | -9490 |
| 0,00 | -6645 | -3899 | -8820 | -11631 | -15574 | -16546 | -9579 |





Príloha číslo 4: Ohybové momenty

| y | Maximálny ohyb | | Maximálny krut | |
|-------|----------------|------------|----------------|----------|
| | Mo1 | Mo1 | Mo1 | Mo1 |
| [m] | [Nmm] | [Nmm] | [Nmm] | [Nmm] |
| 4,875 | 449611 | 200568,77 | -273205 | -121875 |
| 4,621 | 792297 | 341053,89 | -479309 | -206325 |
| 4,042 | 3704956 | 629451,39 | -2206987 | -374955 |
| 3,65 | 7106482 | 1656275,63 | -4177055 | -973527 |
| 3,33 | 10299371 | 1555539,50 | -6005433 | -907015 |
| 2,51 | 24509316 | 1689473,46 | -13785271 | -950245 |
| 1,798 | 39339146 | 4979788,91 | -20636952 | -2612351 |
| 1,195 | 58712151 | 5629157,95 | -28065771 | -2690868 |
| 0,9 | 69818630 | 6014357,83 | -31599181 | -2722035 |
| 0,792 | 74191741 | 6138809,46 | -32876916 | -2720318 |

Príloha číslo 5: Únosnosť zvarov

| | | Maximálny ohyb | Maximálny krut |
|-----------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| Celková sila v mieste zvaru | F zvaru [N] | 186918 | -53660,41 |
| Dĺžka zvaru | l zvar [mm] | 972 | 972 |
| Šírka zvaru | z zvaru [mm] | 10 | 10 |
| Výška zvaru | a zvaru [mm] | 7 | 7 |
| Šmykové napätie II | τ II [Mpa] | 13,74 | -3,94 |
| Šmykové napätie T | τ T [Mpa] | 74,62 | -23,27 |
| Celkové šmykové napätie | τ celk [Mpa] | 75,88 | 23,60 |
| Bezpečnosť zvaru | η zvaru [-] | 2,17 | 6,99 |

Príloha číslo 6: Rozloženie zložiek síl a výpočet ramien pre skúšky

Pre skúšku maximálneho ohybu:

| | c | Tv | Tn | Tt | Mn | Mt | Mk |
|-------|-------|-----------|---------|--------|---------|---------|---------|
| | [m] | [N] | [N] | [N] | [Nm] | [Nm] | [Nm] |
| 5,400 | 0,091 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 5,361 | 0,331 | 34,003 | 33,7 | 4,5 | 0,7 | 0,1 | -5,7 |
| 5,312 | 0,463 | 144,081 | 142,8 | 19,0 | 5,0 | 0,7 | -19,2 |
| 5,243 | 0,577 | 358,421 | 355,3 | 47,2 | 22,2 | 2,9 | -48,7 |
| 5,156 | 0,669 | 698,604 | 692,5 | 92,0 | 67,7 | 9,0 | -98,4 |
| 5,049 | 0,742 | 1196,969 | 1186,6 | 157,6 | 168,3 | 22,3 | -173,5 |
| 4,924 | 0,797 | 1865,323 | 1849,1 | 245,6 | 358,0 | 47,5 | -274,5 |
| 4,850 | 0,818 | 2307,069 | 2287,0 | 303,7 | 511,0 | 67,9 | -340,5 |
| 4,850 | 0,818 | 2307,069 | 2287,0 | 303,7 | 511,0 | 67,9 | -340,5 |
| 4,782 | 0,838 | 2712,997 | 2689,4 | 357,2 | 680,2 | 90,3 | -401,2 |
| 4,621 | 0,876 | 3766,402 | 3733,6 | 495,9 | 1197,3 | 159,0 | -558,1 |
| 4,444 | 0,914 | 5020,082 | 4976,4 | 660,9 | 1968,1 | 261,4 | -745,8 |
| 4,300 | 0,942 | 6113,528 | 6060,3 | 804,9 | 2762,8 | 366,9 | -911,5 |
| 4,300 | 0,942 | 6113,528 | 6060,3 | 804,9 | 2762,8 | 366,9 | -911,5 |
| 4,251 | 0,952 | 6485,603 | 6429,2 | 853,8 | 3068,8 | 407,6 | -967,8 |
| 4,042 | 0,990 | 8174,846 | 8103,7 | 1076,2 | 4587,4 | 609,2 | -1227,9 |
| 3,818 | 1,028 | 10092,189 | 10004,3 | 1328,6 | 6615,5 | 878,6 | -1528,3 |
| 3,750 | 1,039 | 10706,491 | 10613,3 | 1409,5 | 7316,5 | 971,7 | -1626,4 |
| 3,750 | 1,039 | 10706,491 | 10613,3 | 1409,5 | 7316,5 | 971,7 | -1626,4 |
| 3,581 | 1,066 | 12233,213 | 12126,7 | 1610,5 | 9238,1 | 1226,9 | -1870,1 |
| 3,330 | 1,103 | 14620,740 | 14493,5 | 1924,8 | 12578,9 | 1670,6 | -2257,6 |
| 3,200 | 1,121 | 15922,206 | 15783,6 | 2096,2 | 14546,9 | 1931,9 | -2471,6 |
| 3,200 | 1,121 | 15922,206 | 15783,6 | 2096,2 | 14546,9 | 1931,9 | -2471,6 |
| 3,068 | 1,139 | 17243,693 | 17093,6 | 2270,1 | 16716,8 | 2220,1 | -2688,9 |
| 2,794 | 1,176 | 20141,948 | 19966,6 | 2651,7 | 21794,1 | 2894,4 | -3169,7 |
| 2,650 | 1,194 | 21766,617 | 21577,2 | 2865,6 | 24785,2 | 3291,6 | -3438,1 |
| 2,650 | 1,194 | 21766,617 | 21577,2 | 2865,6 | 24785,2 | 3291,6 | -3438,1 |
| 2,510 | 1,212 | 23346,157 | 23143,0 | 3073,5 | 27915,6 | 3707,4 | -3699,0 |
| 2,267 | 1,241 | 26277,360 | 26048,6 | 3459,4 | 33892,4 | 4501,1 | -4173,6 |
| 2,100 | 1,260 | 28412,862 | 28165,6 | 3740,6 | 38419,3 | 5102,3 | -4514,0 |
| 2,100 | 1,260 | 28412,862 | 28165,6 | 3740,6 | 38419,3 | 5102,3 | -4514,0 |
| 2,029 | 1,268 | 29320,770 | 29065,6 | 3860,1 | 40451,0 | 5372,2 | -4658,8 |
| 1,798 | 1,293 | 32430,418 | 32148,1 | 4269,5 | 47521,2 | 6311,1 | -5148,4 |
| 1,580 | 1,315 | 35509,785 | 35200,7 | 4674,9 | 54862,2 | 7286,1 | -5626,2 |
| 1,550 | 1,318 | 35952,544 | 35639,6 | 4733,2 | 55924,8 | 7427,2 | -5694,1 |
| 1,550 | 1,318 | 35952,544 | 35639,6 | 4733,2 | 55924,8 | 7427,2 | -5694,1 |
| 1,378 | 1,336 | 38491,033 | 38156,0 | 5067,4 | 62271,2 | 8270,0 | -6083,2 |
| 1,195 | 1,353 | 41292,018 | 40932,6 | 5436,1 | 69507,9 | 9231,1 | -6507,8 |
| 1,035 | 1,368 | 43811,310 | 43430,0 | 5767,8 | 76256,9 | 10127,4 | -6887,2 |
| 1,000 | 1,371 | 44374,033 | 43987,8 | 5841,9 | 77786,7 | 10330,6 | -6971,6 |
| 1,000 | 1,371 | 44374,033 | 43987,8 | 5841,9 | 77786,7 | 10330,6 | -6971,6 |
| 0,900 | 1,380 | 45981,814 | 45581,6 | 6053,5 | 82265,1 | 10925,4 | -7212,9 |
| 0,792 | 1,390 | 47743,793 | 47328,2 | 6285,5 | 87282,3 | 11591,7 | -7477,2 |

| | Náhrad a Tt | Zavede ná Tt | Náhrad a Mot | Náhrad a Tn | Zavede ná Tn | Náhrad a Mon | 0,25 c | ramen o k 25% | Náhrad a MK | Celková náhrad a |
|-----|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------|---------------------|----------------|------------------------|
| | [N] | [N] | [Nm] | [N] | [N] | [Nm] | [m] | [m] | [Nm] | [N] |
| 5,4 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,023 | | 0,0 | 0 |
| 5,4 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,083 | | 0,0 | 0 |
| 5,3 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,116 | | 0,0 | 0 |
| 5,2 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,144 | | 0,0 | 0 |
| 5,2 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,167 | | 0,0 | 0 |
| 5,0 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,186 | | 0,0 | 0 |
| 4,9 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,199 | | 0,0 | 0 |
| 4,9 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,205 | | 0,0 | 0 |
| 4,9 | 3900 | 3900 | 0 | 600 | 600 | 0 | 0,205 | -0,1489 | -580,7 | 3945,88 |
| 4,8 | 3900 | | 265,2 | 600 | | 41 | 0,210 | | -580,7 | 0 |
| 4,6 | 3900 | | 893,1 | 600 | | 137 | 0,219 | | -580,7 | 0 |
| 4,4 | 3900 | | 1583,4 | 600 | | 244 | 0,229 | | -580,7 | 0 |
| 4,3 | 3900 | | 2145 | 600 | | 330 | 0,236 | | -580,7 | 0 |
| 4,3 | 8400 | 4500 | 2145 | 1000 | 400 | 330 | 0,236 | -0,1504 | -1257,5 | 4517,74 |
| 4,3 | 8400 | | 2556,6 | 1000 | | 379 | 0,238 | | -1257,5 | 0 |
| 4,0 | 8400 | | 4312,2 | 1000 | | 588 | 0,248 | | -1257,5 | 0 |
| 3,8 | 8400 | | 6193,8 | 1000 | | 812 | 0,257 | | -1257,5 | 0 |
| 3,8 | 8400 | | 6765 | 1000 | | 880 | 0,260 | | -1257,5 | 0 |
| 3,8 | 13500 | 5100 | 6765 | 1800 | 800 | 880 | 0,260 | -0,1532 | -2039,0 | 5162,36 |
| 3,6 | 13500 | | 9046,5 | 1800 | | 1184 | 0,267 | | -2039,0 | 0 |
| 3,3 | 13500 | | 12435 | 1800 | | 1636 | 0,276 | | -2039,0 | 0 |
| 3,2 | 13500 | | 14190 | 1800 | | 1870 | 0,280 | | -2039,0 | 0 |
| 3,2 | 18000 | 4500 | 14190 | 2500 | 700 | 1870 | 0,280 | -0,1566 | -2743,7 | 4554,12 |
| 3,1 | 18000 | | 16566 | 2500 | | 2200 | 0,285 | | -2743,7 | 0 |
| 2,8 | 18000 | | 21498 | 2500 | | 2885 | 0,294 | | -2743,7 | 0 |
| 2,7 | 18000 | | 24090 | 2500 | | 3245 | 0,299 | | -2743,7 | 0 |
| 2,7 | 25000 | 7000 | 24090 | 3200 | 700 | 3245 | 0,299 | -0,1593 | -3859,1 | 7034,91 |
| 2,5 | 25000 | | 27590 | 3200 | | 3693 | 0,303 | | -3859,1 | 0 |
| 2,3 | 25000 | | 33665 | 3200 | | 4471 | 0,310 | | -3859,1 | 0 |
| 2,1 | 25000 | | 37840 | 3200 | | 5005 | 0,315 | | -3859,1 | 0 |
| 2,1 | 32500 | 7500 | 37840 | 4200 | 1000 | 5005 | 0,315 | -0,1603 | -5061,1 | 7566,37 |
| 2,0 | 32500 | | 40147,5 | 4200 | | 5303 | 0,317 | | -5061,1 | 0 |
| 1,8 | 32500 | | 47655 | 4200 | | 6273 | 0,323 | | -5061,1 | 0 |
| 1,6 | 32500 | | 54740 | 4200 | | 7189 | 0,329 | | -5061,1 | 0 |
| 1,6 | 32500 | | 55715 | 4200 | | 7315 | 0,330 | | -5061,1 | 0 |
| 1,6 | 40000 | 7500 | 55715 | 5400 | 1200 | 7315 | 0,330 | -0,1598 | -6259,3 | 7595,39 |
| 1,4 | 40000 | | 62595 | 5400 | | 8244 | 0,334 | | -6259,3 | 0 |
| 1,2 | 40000 | | 69915 | 5400 | | 9232 | 0,338 | | -6259,3 | 0 |
| 1,0 | 40000 | | 76315 | 5400 | | 10096 | 0,342 | | -6259,3 | 0 |
| 1,0 | 40000 | | 77715 | 5400 | | 10285 | 0,343 | | -6259,3 | 0 |
| 1,0 | 47328 | 7328 | 77715 | 6286 | 886 | 10285 | 0,343 | -0,1585 | -7420,8 | 7381,54 |
| 0,9 | 47328 | | 82448 | 6286 | | 10914 | 0,345 | | -7420,8 | 0 |
| 0,8 | 47328 | | 87559 | 6286 | | 11592 | 0,348 | | -7420,8 | 0 |

Pre skúšku maximálneho ohybu s plnou nádržou:

| | c | Tv | Tn | Tt | Mn | Mt | Mk |
|-------|-------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| | [m] | [N] | [N] | [N] | [Nm] | [Nm] | [Nm] |
| 5,400 | 0,091 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 5,361 | 0,331 | 36,0 | 35,7 | 4,9 | 0,7 | 0,1 | -5,7 |
| 5,312 | 0,463 | 152,1 | 150,7 | 20,7 | 5,3 | 0,7 | -19,4 |
| 5,243 | 0,577 | 377,8 | 374,3 | 51,3 | 23,4 | 3,2 | -49,2 |
| 5,156 | 0,669 | 735,9 | 729,1 | 100,0 | 71,4 | 9,8 | -99,5 |
| 5,049 | 0,742 | 1260,1 | 1248,4 | 171,2 | 177,2 | 24,3 | -175,5 |
| 4,924 | 0,797 | 1962,6 | 1944,4 | 266,6 | 376,7 | 51,7 | -277,7 |
| 4,850 | 0,818 | 2426,7 | 2404,2 | 329,6 | 537,6 | 73,7 | -344,5 |
| 4,850 | 0,818 | 2426,7 | 2404,2 | 329,6 | 537,6 | 73,7 | -344,5 |
| 4,782 | 0,838 | 2853,1 | 2826,7 | 387,6 | 715,5 | 98,1 | -405,9 |
| 4,621 | 0,876 | 3959,0 | 3922,4 | 537,8 | 1258,8 | 172,6 | -564,7 |
| 4,444 | 0,914 | 5274,6 | 5225,7 | 716,5 | 2068,4 | 283,6 | -754,7 |
| 4,300 | 0,942 | 6421,4 | 6361,9 | 872,3 | 2902,7 | 398,0 | -922,4 |
| 4,300 | 0,942 | 6421,4 | 6361,9 | 872,3 | 2902,7 | 398,0 | -922,4 |
| 4,251 | 0,952 | 6811,7 | 6748,5 | 925,3 | 3223,9 | 442,0 | -979,5 |
| 4,042 | 0,990 | 8582,8 | 8503,2 | 1165,9 | 4817,7 | 660,5 | -1242,7 |
| 3,818 | 1,028 | 10592,3 | 10494,1 | 1438,8 | 6945,4 | 952,3 | -1546,9 |
| 3,750 | 1,039 | 11235,8 | 11131,7 | 1526,2 | 7680,7 | 1053,1 | -1646,1 |
| 3,750 | 1,039 | 11235,8 | 11131,7 | 1526,2 | 7680,7 | 1053,1 | -1646,1 |
| 3,581 | 1,066 | 12835,2 | 12716,2 | 1743,5 | 9695,8 | 1329,4 | -1892,9 |
| 3,330 | 1,103 | 15335,0 | 15192,8 | 2083,1 | 13198,4 | 1809,6 | -2285,1 |
| 3,200 | 1,121 | 16696,9 | 16542,2 | 2268,1 | 15261,2 | 2092,4 | -2501,8 |
| 3,200 | 1,121 | 16696,9 | 16542,2 | 2268,1 | 15261,2 | 2092,4 | -2501,8 |
| 3,068 | 1,139 | 18079,8 | 17912,3 | 2455,9 | 17535,2 | 2404,2 | -2721,7 |
| 2,794 | 1,176 | 21110,1 | 20914,5 | 2867,5 | 22854,4 | 3133,5 | -3208,4 |
| 2,650 | 1,194 | 22806,4 | 22595,0 | 3097,9 | 25987,1 | 3563,0 | -3365,5 |
| 2,650 | 1,194 | 22806,4 | 22595,0 | 3097,9 | 25987,1 | 3563,0 | -3365,5 |
| 2,510 | 1,212 | 24455,5 | 24228,9 | 3322,0 | 29264,8 | 4012,4 | -3518,1 |
| 2,267 | 1,241 | 26108,4 | 25866,4 | 3546,5 | 35351,4 | 4846,9 | -3597,7 |
| 2,100 | 1,260 | 27345,2 | 27091,7 | 3714,5 | 39773,4 | 5453,2 | -3654,5 |
| 2,100 | 1,260 | 27345,2 | 27091,7 | 3714,5 | 39773,4 | 5453,2 | -3654,5 |
| 2,029 | 1,268 | 27871,0 | 27612,7 | 3785,9 | 41715,4 | 5719,5 | -3678,7 |
| 1,798 | 1,293 | 29711,6 | 29436,2 | 4035,9 | 48304,5 | 6622,9 | -3759,8 |
| 1,580 | 1,315 | 31571,3 | 31278,6 | 4288,5 | 54922,4 | 7530,3 | -3838,5 |
| 1,550 | 1,318 | 31843,4 | 31548,3 | 4325,5 | 55864,8 | 7659,5 | -3849,6 |
| 1,550 | 1,318 | 31843,4 | 31548,3 | 4325,5 | 55864,8 | 7659,5 | -3849,6 |
| 1,378 | 1,336 | 33403,6 | 33094,0 | 4537,4 | 61424,1 | 8421,7 | -3913,5 |
| 1,195 | 1,353 | 35148,4 | 34822,7 | 4774,4 | 67638,4 | 9273,7 | -3982,5 |
| 1,035 | 1,368 | 36733,1 | 36392,6 | 4989,7 | 73335,7 | 10054,9 | -4043,9 |
| 1,000 | 1,371 | 37089,3 | 36745,5 | 5038,1 | 74615,6 | 10230,3 | -4057,5 |
| 1,000 | 1,371 | 37089,3 | 36745,5 | 5038,1 | 74615,6 | 10230,3 | -4057,5 |
| 0,900 | 1,380 | 38107,0 | 37753,8 | 5176,3 | 78340,5 | 10741,1 | -4096,3 |
| 0,792 | 1,390 | 39930,4 | 39560,3 | 5424,0 | 82515,5 | 11313,5 | -4251,7 |

| | Náhra da Tt | Zave dená Tt | Náhrada Mot | Nahrád a Tn | Zavede ná Tn | Náhrada Mon | 0,25 c | ramen o k 25% | Náhrad a MK | Celková náhrada |
|-------|----------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|--------|---------------------|----------------|--------------------|
| | [N] | [N] | [Nm] | [N] | [N] | [Nm] | [m] | [m] | [Nm] | [N] |
| 5,400 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,023 | | 0 | 0 |
| 5,361 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,083 | | 0 | 0 |
| 5,312 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,116 | | 0 | 0 |
| 5,243 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,144 | | 0 | 0 |
| 5,156 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,167 | | 0 | 0 |
| 5,049 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,186 | | 0 | 0 |
| 4,924 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,199 | | 0 | 0 |
| 4,850 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,205 | | 0 | 0 |
| 4,850 | 4900 | 4900 | 0 | 550 | 550 | 0 | 0,205 | -0,100 | -490 | 4931 |
| 4,782 | 4900 | | 333 | 550 | | 37 | 0,210 | | -490 | 0 |
| 4,621 | 4900 | | 1122 | 550 | | 126 | 0,219 | | -490 | 0 |
| 4,444 | 4900 | | 1989 | 550 | | 223 | 0,229 | | -490 | 0 |
| 4,300 | 4900 | | 2695 | 550 | | 303 | 0,236 | | -490 | 0 |
| 4,300 | 8500 | 3600 | 2695 | 1200 | 650 | 303 | 0,236 | -0,230 | -1318 | 3658 |
| 4,251 | 8500 | | 3112 | 1200 | | 361 | 0,238 | | -1318 | 0 |
| 4,042 | 8500 | | 4888 | 1200 | | 612 | 0,248 | | -1318 | 0 |
| 3,818 | 8500 | | 6792 | 1200 | | 881 | 0,257 | | -1318 | 0 |
| 3,750 | 8500 | | 7370 | 1200 | | 963 | 0,260 | | -1318 | 0 |
| 3,750 | 14600 | 6100 | 7370 | 1800 | 600 | 963 | 0,260 | -0,120 | -2050 | 6129 |
| 3,581 | 14600 | | 9837 | 1800 | | 1267 | 0,267 | | -2050 | 0 |
| 3,330 | 14600 | | 13502 | 1800 | | 1719 | 0,276 | | -2050 | 0 |
| 3,200 | 14600 | | 15400 | 1800 | | 1953 | 0,280 | | -2050 | 0 |
| 3,200 | 18700 | 4100 | 15400 | 2600 | 800 | 1953 | 0,280 | -0,190 | -2829 | 4177 |
| 3,068 | 18700 | | 17868 | 2600 | | 2296 | 0,285 | | -2829 | 0 |
| 2,794 | 18700 | | 22992 | 2600 | | 3008 | 0,294 | | -2829 | 0 |
| 2,650 | 18700 | | 25685 | 2600 | | 3383 | 0,299 | | -2829 | 0 |
| 2,650 | 25000 | 6300 | 25685 | 3400 | 800 | 3383 | 0,299 | -0,120 | -3585 | 6351 |
| 2,510 | 25000 | | 29185 | 3400 | | 3859 | 0,303 | | -3585 | 0 |
| 2,267 | 25000 | | 35260 | 3400 | | 4685 | 0,310 | | -3585 | 0 |
| 2,100 | 25000 | | 39435 | 3400 | | 5253 | 0,315 | | -3585 | 0 |
| 2,100 | 30000 | 5000 | 39435 | 4000 | 600 | 5253 | 0,315 | -0,030 | -3735 | 5036 |
| 2,029 | 30000 | | 41565 | 4000 | | 5537 | 0,317 | | -3735 | 0 |
| 1,798 | 30000 | | 48495 | 4000 | | 6461 | 0,323 | | -3735 | 0 |
| 1,580 | 30000 | | 55035 | 4000 | | 7333 | 0,329 | | -3735 | 0 |
| 1,550 | 30000 | | 55935 | 4000 | | 7453 | 0,330 | | -3735 | 0 |
| 1,550 | 33500 | 3500 | 55935 | 4700 | 700 | 7453 | 0,330 | -0,060 | -3945 | 3569 |
| 1,378 | 33500 | | 61697 | 4700 | | 8261 | 0,334 | | -3945 | 0 |
| 1,195 | 33500 | | 67828 | 4700 | | 9121 | 0,338 | | -3945 | 0 |
| 1,035 | 33500 | | 73188 | 4700 | | 9873 | 0,342 | | -3945 | 0 |
| 1,000 | 33500 | | 74360 | 4700 | | 10038 | 0,343 | | -3945 | 0 |
| 1,000 | 39560 | 6060 | 74360 | 5424 | 724 | 10038 | 0,343 | -0,051 | -4251 | 6103 |
| 0,900 | 39560 | | 78316 | 5424 | | 10580 | 0,345 | | -4251 | 0 |
| 0,792 | 39560 | | 82589 | 5424 | | 11166 | 0,348 | | -4251 | 0 |

Pre maximálny krut krídla:

| | c | Tv | Tn | Tt | Mn | Mt | Mk |
|-------|-------|-----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| | [m] | [N] | [N] | [N] | | [Nm] | [Nm] |
| 5,400 | 0,091 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5,361 | 0,331 | -28,96 | -28,91 | 1,57 | -0,56 | 0,03 | -9,33 |
| 5,312 | 0,463 | -120,96 | -120,78 | 6,56 | -4,23 | 0,23 | -32,32 |
| 5,243 | 0,577 | -299,41 | -298,97 | 16,24 | -18,71 | 1,02 | -82,64 |
| 5,156 | 0,669 | -581,49 | -580,63 | 31,55 | -56,98 | 3,10 | -167,97 |
| 5,049 | 0,742 | -992,82 | -991,36 | 53,86 | -141,08 | 7,67 | -297,11 |
| 4,924 | 0,797 | -1541,62 | -1539,35 | 83,64 | -299,25 | 16,26 | -471,20 |
| 4,850 | 0,818 | -1902,25 | -1899,45 | 103,20 | -426,48 | 23,17 | -585,15 |
| 4,850 | 0,818 | -1902,25 | -1899,45 | 103,20 | -426,48 | 23,17 | -585,15 |
| 4,782 | 0,838 | -2233,65 | -2230,36 | 121,18 | -566,90 | 30,80 | -689,86 |
| 4,621 | 0,876 | -3087,96 | -3083,41 | 167,53 | -994,65 | 54,04 | -960,79 |
| 4,444 | 0,914 | -4097,07 | -4091,04 | 222,28 | -1629,59 | 88,54 | -1285,05 |
| 4,300 | 0,942 | -4969,63 | -4962,31 | 269,62 | -2281,43 | 123,96 | -1571,25 |
| 4,300 | 0,942 | -4969,63 | -4962,31 | 269,62 | -2281,43 | 123,96 | -1571,25 |
| 4,251 | 0,952 | -5266,54 | -5258,78 | 285,73 | -2531,85 | 137,56 | -1668,64 |
| 4,042 | 0,990 | -6600,71 | -6590,99 | 358,11 | -3770,15 | 204,84 | -2117,85 |
| 3,818 | 1,028 | -8095,63 | -8083,71 | 439,21 | -5413,72 | 294,14 | -2636,98 |
| 3,750 | 1,039 | -8566,70 | -8554,08 | 464,77 | -5979,40 | 324,88 | -2806,44 |
| 3,750 | 1,039 | -8566,70 | -8554,08 | 464,77 | -5979,40 | 324,88 | -2806,44 |
| 3,581 | 1,066 | -9737,44 | -9723,10 | 528,29 | -7523,82 | 408,79 | -3227,60 |
| 3,330 | 1,103 | -11528,49 | -11511,51 | 625,46 | -10188,77 | 553,59 | -3897,30 |
| 3,200 | 1,121 | -12475,43 | -12457,06 | 676,83 | -11746,73 | 638,24 | -4267,17 |
| 3,200 | 1,121 | -12475,43 | -12457,06 | 676,83 | -11746,73 | 638,24 | -4267,17 |
| 3,068 | 1,139 | -13436,94 | -13417,15 | 729,00 | -13454,42 | 731,02 | -4642,73 |
| 2,794 | 1,176 | -15447,95 | -15425,20 | 838,10 | -17405,82 | 945,71 | -5473,77 |
| 2,650 | 1,194 | -16488,13 | -16463,84 | 894,53 | -19701,83 | 1070,46 | -5961,08 |
| 2,650 | 1,194 | -16488,13 | -16463,84 | 894,53 | -19701,83 | 1070,46 | -5961,08 |
| 2,510 | 1,212 | -17499,41 | -17473,64 | 949,40 | -22077,46 | 1199,54 | -6434,85 |
| 2,267 | 1,241 | -18497,66 | -18470,42 | 1003,56 | -26444,66 | 1436,82 | -7337,49 |
| 2,100 | 1,260 | -19122,11 | -19093,95 | 1037,43 | -29581,29 | 1607,24 | -7985,17 |
| 2,100 | 1,260 | -19122,11 | -19093,95 | 1037,43 | -29581,29 | 1607,24 | -7985,17 |
| 2,029 | 1,268 | -19387,60 | -19359,04 | 1051,84 | -30946,37 | 1681,41 | -8260,53 |
| 1,798 | 1,293 | -20168,15 | -20138,45 | 1094,18 | -35508,33 | 1929,28 | -9192,20 |
| 1,580 | 1,315 | -20818,37 | -20787,71 | 1129,46 | -39969,28 | 2171,66 | -10101,74 |
| 1,550 | 1,318 | -20895,82 | -20865,04 | 1133,66 | -40594,07 | 2205,60 | -10230,94 |
| 1,550 | 1,318 | -20895,82 | -20865,04 | 1133,66 | -40594,07 | 2205,60 | -10230,94 |
| 1,378 | 1,336 | -21339,83 | -21308,40 | 1157,75 | -44220,99 | 2402,66 | -10971,70 |
| 1,195 | 1,353 | -21747,33 | -21715,30 | 1179,86 | -48157,65 | 2616,56 | -11780,15 |
| 1,035 | 1,368 | -22057,02 | -22024,53 | 1196,66 | -51656,84 | 2806,68 | -12502,81 |
| 1,000 | 1,371 | -22117,11 | -22084,54 | 1199,92 | -52428,75 | 2848,62 | -12663,70 |
| 1,000 | 1,371 | -22117,11 | -22084,54 | 1199,92 | -52428,75 | 2848,62 | -12663,70 |
| 0,900 | 1,380 | -22288,82 | -22255,99 | 1209,24 | -54645,78 | 2969,08 | -13123,37 |
| 0,792 | 1,390 | -22804,64 | -22771,06 | 1237,22 | -57077,24 | 3101,18 | -13604,00 |

| | Náhrad a Tt | Zaved ená Tt | Náhrada Mot | Nahrá da Tn | Zaved ená Tn | Náhrada Mon | 0,25 c | ramen o k 25% | Náhrad a MK | Celková náhrada |
|-------|----------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|--------|---------------------|----------------|--------------------|
| | [N] | [N] | [Nm] | [N] | [N] | [Nm] | [m] | [m] | [Nm] | [N] |
| 5,400 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,023 | | 0,0000 | 0 |
| 5,361 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,083 | | 0 | 0 |
| 5,312 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,116 | | 0 | 0 |
| 5,243 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,144 | | 0 | 0 |
| 5,156 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,167 | | 0 | 0 |
| 5,049 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,186 | | 0 | 0 |
| 4,924 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,199 | | 0 | 0 |
| 4,850 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0,205 | | 0 | 0 |
| 4,850 | -3500 | -3500 | 0 | 125 | 125 | 0 | 0,205 | 0,3000 | -1050 | 3502 |
| 4,782 | -3500 | | -238 | 125 | | 9 | 0,210 | | -1050 | 0 |
| 4,621 | -3500 | | -801,5 | 125 | | 29 | 0,219 | | -1050 | 0 |
| 4,444 | -3500 | | -1421 | 125 | | 51 | 0,229 | | -1050 | 0 |
| 4,300 | -3500 | | -1925 | 125 | | 69 | 0,236 | | -1050 | 0 |
| 4,300 | -7000 | -3500 | -1925 | 300 | 175 | 69 | 0,236 | 0,3000 | -2100 | 3504 |
| 4,251 | -7000 | | -2268 | 300 | | 83 | 0,238 | | -2100 | 0 |
| 4,042 | -7000 | | -3731 | 300 | | 146 | 0,248 | | -2100 | 0 |
| 3,818 | -7000 | | -5299 | 300 | | 213 | 0,257 | | -2100 | 0 |
| 3,750 | -7000 | | -5775 | 300 | | 234 | 0,260 | | -2100 | 0 |
| 3,750 | -10500 | -3500 | -5775 | 600 | 300 | 234 | 0,260 | 0,4000 | -3500 | 3513 |
| 3,581 | -10500 | | -7549,5 | 600 | | 335 | 0,267 | | -3500 | 0 |
| 3,330 | -10500 | | -10185 | 600 | | 486 | 0,276 | | -3500 | 0 |
| 3,200 | -10500 | | -11550 | 600 | | 564 | 0,280 | | -3500 | 0 |
| 3,200 | -14300 | -3800 | -11550 | 700 | 100 | 564 | 0,280 | 0,4000 | -5020 | 3801 |
| 3,068 | -14300 | | -13437,6 | 700 | | 656 | 0,285 | | -5020 | 0 |
| 2,794 | -14300 | | -17355,8 | 700 | | 848 | 0,294 | | -5020 | 0 |
| 2,650 | -14300 | | -19415 | 700 | | 949 | 0,299 | | -5020 | 0 |
| 2,650 | -18500 | -4200 | -19415 | 950 | 250 | 949 | 0,299 | 0,5000 | -7120 | 4207 |
| 2,510 | -18500 | | -22005 | 950 | | 1082 | 0,303 | | -7120 | 0 |
| 2,267 | -18500 | | -26500,5 | 950 | | 1313 | 0,310 | | -7120 | 0 |
| 2,100 | -18500 | | -29590 | 950 | | 1471 | 0,315 | | -7120 | 0 |
| 2,100 | -20000 | -1500 | -29590 | 1100 | 150 | 1471 | 0,315 | 1,3000 | -9070 | 1507 |
| 2,029 | -20000 | | -31010 | 1100 | | 1549 | 0,317 | | -9070 | 0 |
| 1,798 | -20000 | | -35630 | 1100 | | 1803 | 0,323 | | -9070 | 0 |
| 1,580 | -20000 | | -39990 | 1100 | | 2043 | 0,329 | | -9070 | 0 |
| 1,550 | -20000 | | -40590 | 1100 | | 2076 | 0,330 | | -9070 | 0 |
| 1,550 | -21500 | -1500 | -40590 | 1150 | 50 | 2076 | 0,330 | 1,5000 | -11320 | 1501 |
| 1,378 | -21500 | | -44288 | 1150 | | 2274 | 0,334 | | -11320 | 0 |
| 1,195 | -21500 | | -48222,5 | 1150 | | 2485 | 0,338 | | -11320 | 0 |
| 1,035 | -21500 | | -51662,5 | 1150 | | 2669 | 0,342 | | -11320 | 0 |
| 1,000 | -21500 | | -52415 | 1150 | | 2709 | 0,343 | | -11320 | 0 |
| 1,000 | -22771 | -1271 | -52415 | 1237 | 87 | 2709 | 0,343 | 1,7969 | -13604 | 1274 |
| 0,900 | -22771 | | -54692 | 1237 | | 2832 | 0,345 | | -13604 | 0 |
| 0,792 | -22771 | | -57151 | 1237 | | 2966 | 0,348 | | -13604 | 0 |